

DERWENT-ACC-NO: 2003-686707

DERWENT-WEEK: 200365

COPYRIGHT 2005 DERWENT INFORMATION LTD

TITLE: Radio-signal dynamic memory device with binary
fiber-optic structure

INVENTOR: GORBUNOV, A V; RUMYANTSEV, K E

PATENT-ASSIGNEE: UNIV S RUSSIA ECONOMICS & SERVICES [UYSRR]

PRIORITY-DATA: 2001RU-0135692 (December 24, 2001)

PATENT-FAMILY:

PUB-NO	PUB-DATE	LANGUAGE
PAGES MAIN-IPC		
RU 2210121 C1	August 10, 2003	N/A
000 G11C 011/401		

APPLICATION-DATA:

PUB-NO	APPL-DESCRIPTOR	APPL-NO
APPL-DATE		
RU 2210121C1	N/A	2001RU-0135692
December 24, 2001		

INT-CL (IPC): G02B006/00, G11C011/401 , G11C011/42

ABSTRACTED-PUB-NO: RU 2210121C

BASIC-ABSTRACT:

NOVELTY - Device has power splitter, optical transmitter with laser diode,
X-type fiber directional couplers, fiber-optic amplifier, fiber-optic delay
lines, fiber-optic switch, photodetector, control unit, broadband
amplifier,
Y-type separating fiber directional coupler, N - 1 fiber-optic delay
lines, and
electronic switch.

USE - Radio signal shaping and processing technique.

ADVANTAGE - Enhanced identity of radio signal copies shaped across
dynamic
memory device. 1 cl, 15 dwg

CHOSEN-DRAWING: Dwg.1/1

TITLE-TERMS: RADIO SIGNAL DYNAMIC MEMORY DEVICE BINARY OPTICAL
STRUCTURE

DERWENT-CLASS: P81 U14 V07

EPI-CODES: U14-A02A; U14-A03B4; V07-F01A;

SECONDARY-ACC-NO:

Non-CPI Secondary Accession Numbers: N2003-548399



(19) RU (11) 2 210 121 (13) C1

(51) МПК⁷ G 11 C 11/401, 11/42, G 02 B

6/00

РОССИЙСКОЕ АГЕНТСТВО
ПО ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

(21), (22) Заявка: 2001135692/09, 24.12.2001

(24) Дата начала действия патента: 24.12.2001

(46) Дата публикации: 10.08.2003

(56) Ссылки: RU 2149464 C1, 20.05.2000, US 4557552 A, 10.12.1985. US 4479701 A, 30.10.1984. RU 2082280 C1, 20.06.1997. US 4708421 A, 24.11.1987. US 4789964 A, 06.12.1988.

(98) Адрес для переписки:
346500, Ростовская обл., г. Шахты, ул.
Шевченко, 147, ЮРГУЭС, патентный отдел

(71) Заявитель:
Южно-Российский государственный
университет экономики и сервиса

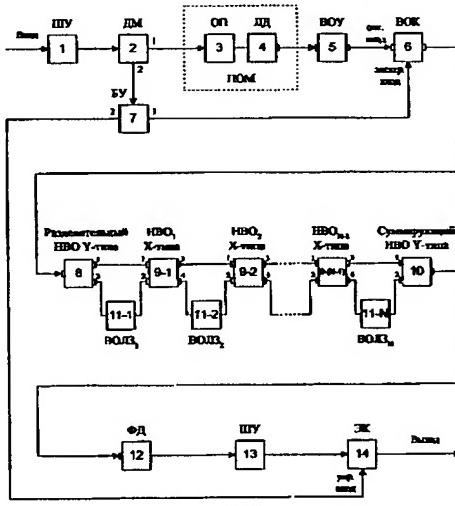
(72) Изобретатель: Румянцев К.Е.,
Горбунов А.В.

(73) Патентообладатель:
Южно-Российский государственный
университет экономики и сервиса

(54) ДИНАМИЧЕСКОЕ ЗАПОМИНАЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО РАДИОСИГНАЛОВ С БИНАРНОЙ
ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ

(57) Реферат:

Изобретение относится к технике формирования и обработки радиосигналов. Техническим результатом является повышение идентичности формируемых копий радиосигнала на выходе динамического запоминающего устройства. Устройство содержит делитель мощности, оптический передатчик с лазерным диодом, направленные волоконные ответвители X-типа, волоконно-оптический усилитель, волоконно-оптические линии задержки, волоконно-оптический ключ, фотодиод, блок управления, широкополосный усилитель, разделительный направленный волоконный ответвитель Y-типа, N-1 волоконно-оптические линии задержки, электронный ключ, 15 ил.



RU 2 210 121 C1

RU 2 210 121 C1



(19) RU (11) 2 210 121 (13) C1

(51) Int. Cl.⁷ G 11 C 11/401, 11/42, G 02 B

6/00

RUSSIAN AGENCY
FOR PATENTS AND TRADEMARKS

(12) ABSTRACT OF INVENTION

(21), (22) Application: 2001135692/09, 24.12.2001

(24) Effective date for property rights: 24.12.2001

(46) Date of publication: 10.08.2003

(98) Mail address:
346500, Rostovskaja obl., g. Shakhty, ul.
Shevchenko, 147, JuRGUEhS, patentnyj otdel

(71) Applicant:
Juzhno-Rossijskij gosudarstvennyj
universitet ekonomiki i servisa

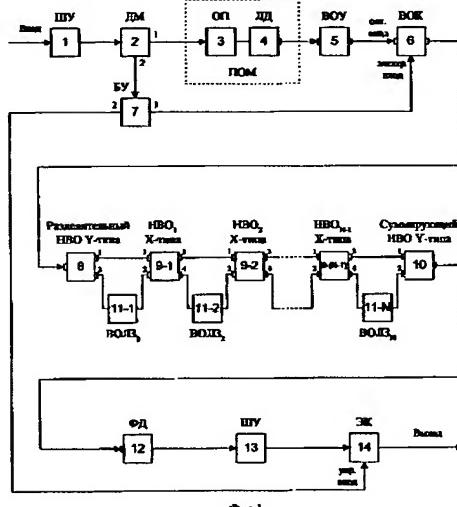
(72) Inventor: Rumjantsev K.E.,
Gorbunov A.V.

(73) Proprietor:
Juzhno-Rossijskij gosudarstvennyj
universitet ekonomiki i servisa

(54) RADIO-SIGNAL DYNAMIC MEMORY DEVICE WITH BINARY FIBER-OPTIC STRUCTURE

(57) Abstract:

FIELD: radio signal shaping and processing technique. SUBSTANCE: device has power splitter, optical transmitter with laser diode, X-type fiber directional couplers, fiber-optic amplifier, fiber-optic delay lines, fiber-optic switch, photodetector, control unit, broadband amplifier, Y-type separating fiber directional coupler, N - 1 fiber-optic delay lines, and electronic switch. EFFECT: enhanced identity of radio signal copies shaped across dynamic memory device. 1 cl, 15 dwg



RU 2 210 121 C1

R U
2 2 1 0 1 2 1
C 1

RU 2210121 C1

Текст описания в факсимильном виде (см. чертежи) Тт

Формула изобретения:

Динамическое запоминающее устройство радиосигналов с бинарной волоконно-оптической структурой, содержащее последовательно соединенные делитель мощности, оптический передатчик с лазерным диодом, а также направленный волоконный ответвитель X-типа, волоконно-оптический усилитель, волоконно-оптическую линию задержки в виде отрезка волоконного световода, волоконно-оптический ключ и фотодетектор, выход которого соединен с входом основного широкополосного усилителя, а также блок управления, вход которого соединен с вторым выходом делителя мощности, а первый выход с электрическим входом волоконно-оптического ключа, отличающееся тем, что в него дополнительно введены дополнительный широкополосный усилитель, разделятельный направленный волоконный ответвитель Y-типа, суммирующий направленный волоконный ответвитель Y-типа, N-2 направленных волоконных ответвителей X-типа, N-1 волоконно-оптических линий задержки и электронный ключ, причем вход устройства является входом дополнительного широкополосного усилителя, выход которого подключен к входу делителя мощности, оптический выход лазерного диода через волоконно-оптический усилитель и волоконно-оптический ключ подключен к входному порту разделятельного направленного волоконного ответвителя Y-типа, первый выходной порт которого соосно подключен к первому входному порту первого направленного волоконного ответвителя X-типа, третий выходной порт

которого соосно подключен к первому входному порту второго направленного волоконного ответвителя X-типа, третий выходной порт j-го направленного волоконного ответвителя X-типа подключен к первому входному порту (j+1)-го направленного волоконного ответвителя X-типа, а третий входной порт последнего (N-1)-го направленного волоконного ответвителя X-типа соединен с первым входным портом суммирующего направленного волоконного ответвителя Y-типа, выходной порт которого оптически соединен с оптическим входом фотодетектора, причем второй выходной порт разделятельного направленного волоконного ответвителя Y-типа через первую волоконно-оптическую линию задержки подключен к второму входному порту первого направленного волоконного ответвителя X-типа, четвертый выходной порт которого через вторую волоконно-оптическую линию задержки соосно соединен с вторым входным портом второго направленного волоконного ответвителя X-типа, четвертый выходной порт j-го направленного волоконного ответвителя X-типа через (j+1)-ю волоконно-оптическую линию задержки соосно подключен к второму входному порту (j+1)-го направленного волоконного ответвителя X-типа, а четвертый выходной порт последнего (N-1)-го направленного волоконного ответвителя X-типа через последнюю N-ю волоконно-оптическую линию задержки соосно подключен к второму входному порту суммирующего направленного волоконного ответвителя Y-типа, причем второй выход блока управления соединен с управляющим входом электронного ключа, вход которого подключен к выходу основного широкополосного усилителя, а выход является выходом устройства.

40

45

50

55

60

RU 2210121 C1

RU ? 2 1 0 1 2 1 C 1

Предлагаемое изобретение относится к технике формирования и обработки радиосигналов.

Известно устройство динамической памяти (патент 4557552 США, МКИ³ G 02 B 5/172), содержащее лазерный диод с модулятором тока, оптический выход которого подключен к входному торцу волоконного световода (ВС), намотанного на барабан. Излучение с отводов (изгибов) ВС на барабане проецируется в оптический стержень, с которого через первую линзу, кодирующий пространственный фильтр-маску и вторую линзу фокусируется на фотодиод (ФД). Входом устройства является электрический вход модулятора тока, а выходом – выход фотодиода.

Признаками аналога, совпадающими с признаками заявляемого технического решения, являются лазерный диод, волоконный световод и фотодиод.

Недостатками известного устройства являются малое время хранения информации, а также сложность изготовления, большой расход волоконного световода и неравномерность уровня копий сигнала на выходе.

Причины, препятствующие достижению требуемого технического результата, состоят в следующем.

Известное устройство по существу является многоотводной волоконно-оптической линией задержки (ЛЗ), причем из технологических соображений коэффициенты ответвления оптического излучения с отводов волоконного световода, намотанного на барабан, в оптический стержень выполняются одинаковыми. В этом случае благодаря последовательному ответвлению части оптического сигнала с постоянными коэффициентами ответвления в оптический стержень и потеря в последнем, амплитуда выходных сигналов устройства с ростом числа копий уменьшается и тем заметнее, чем больше коэффициент ответвления. Например, при коэффициенте ответвления, равном 0,5, амплитуда 10-й копии уменьшается по

сравнению с первой в 500 раз. В результате при постоянном уровне шумов фотодиода отношение сигнал/шум (ОСШ) копий, а, следовательно, и время хранения информации в устройстве, резко снижаются.

Стремление обеспечить равномерность уровня копий сигнала на выходе устройства за счет последовательного увеличения коэффициентов ответвления предполагает использование уникального технологического оборудования и контрольно-измерительной аппаратуры, а также усложнение конструкции и габаритов барабана. В сочетании с большим расходом световолокна, пропорциональным числу формируемых копий, это приводит к значительным материальным затратам при изготовлении устройства.

Известно также запоминающее устройство (патент 4479701 США, МКИ³ G 02 B 5/172), в котором волоконно-оптическая линия задержки (ВОЛЗ) содержит первый и второй направленные волоконные ответвители (НВО) и первый волоконный световод, проходящий через оба НВО. Первый волоконный световод имеет два концевых участка и промежуточный участок. Первый концевой участок протянут от первой стороны первого НВО, а второй концевой участок – от второй стороны второго НВО. Промежуточный участок расположен между второй стороной первого НВО и первой стороной второго НВО.

Волоконно-оптическая ЛЗ содержит также второй волоконный световод, проходящий через оба НВО. Второй волоконный световод имеет два концевых участка и петлеобразный участок. Первый концевой участок протянут от второй стороны первого НВО, второй концевой участок протянут от первой стороны второго НВО, а петлевой участок размещен между первой стороной первого НВО и второй стороной второго НВО. Направленные волоконно-оптические ответвители обеспечивают оптическую связь первого и второго волоконных световодов и передачу света между ними.

Признаком этого аналога, совпадающим с признаками заявляемого технического решения, является волоконный световод, два направленных волоконных ответвители, волоконно-оптическая линия задержки.

Время хранения информации в данном устройстве, как и в первом случае (см. патент 4557552 США, МКИ³ G 02 B 5/172), невелико. Кроме того, указанное уст-

ройство также не обеспечивает равномерность уровня копий выходного радиосигнала.

Причиной, препятствующей достижению требуемого технического результата, является затухание сигнала от копии к копии в связи с последовательным выводом части энергии оптического излучения из процесса циркуляции через второй концевой участок первого волоконного световода и первый концевой участок второго волоконного световода, причем во втором случае энергия оптического излучения бесполезно теряется на свободном торце волоконного световода. В результате при постоянном уровне шумов фотоприемника и заданных коэффициентах оптической связи между первым и вторым волоконными световодами, отношение сигнал/шум копий на выходе устройства и их уровень быстро снижаются, что в конечном итоге и обуславливает малое время хранения информации.

Кроме того, известно динамическое оперативное запоминающее устройство (ДЗУ) с радиочастотной обратной связью (патент 2082280 РФ, МКИ⁶ H04B10/00, G02B6/00, заявл. 05.06.95 N 95108961/28, опубл. 20.06.97, БИ 17).

Устройство содержит последовательно соединенные первый делитель мощности, сумматор мощности с развязанными по радиочастоте входами, оптический передатчик с лазерным диодом, волоконный световод, фотодетектор, широкополосный усилитель мощности СВЧ-колебаний, второй делитель мощности, второй выход которого является выходом устройства, и управляемый аттенюатор, а также первый и второй управляемые ключи электронного коммутатора и блок управления, причем выход управляемого аттенюатора через первый ключ коммутатора подключен ко второму входу сумматора мощности, выход второго ключа коммутатора подключен к входу первого делителя мощности, второй выход которого соединен с входом блока управления; первый выход блока управления подключен к управляющему входу второго ключа, второй – к управляющему входу первого ключа, а третий – к управляющему входу управляемого аттенюатора; вход второго ключа является электрическим входом устройства.

Признаки аналога, совпадающие с признаками заявляемого технического решения, следующие: делитель мощности, оптический передатчик с лазерным диодом, волоконный световод, фотодетектор, соединенный с широкополосным СВЧ-усилителем, управляемый ключ.

Недостатками известного динамического запоминающего устройства является небольшое количество тиражируемых копий радиосигнала в случае преобладания в шумах тепловых и/или дробовых составляющих. Последнее же условие характерно для случаев проектирования динамического запоминающего устройства на фотодиодах без охлаждения.

Причины, препятствующие достижению требуемого технического результата, заключаются в том, что при организации динамической памяти радиосигналов используется радиочастотная обратная связь. При организации длительной оперативной памяти импульсных СВЧ-радиосигналов происходит накопление шумовых флуктуационных составляющих всех узлов устройства.

Из известных технических решений наиболее близким по технической сущности к заявляемому объекту является динамическое запоминающее устройство (ДЗУ) (патент 2149464 РФ, МКИ7 G11 C11/42, заявл. 19.01.1999 №99101673/09, • опубл. 20.05.2000, БИ 14).

Устройство содержит делитель мощности (ДМ), оптический передатчик (ОП) с лазерным диодом (ЛД), волоконно-оптический ключ (ВОК), направленный волоконный ответвитель (НВО), фотоприемник с широкополосным СВЧ-усилителем, а также волоконно-оптический усилитель (ВОУ), волоконный световод (ВС) обеспечивающий задержку оптического сигнала на время t_3 , волоконно-оптический аттенюатор (ВОА) и блок управления (БУ).

Вход ДМ является входом ДЗУ. Первый выход ДМ подключен к входу ОП с ЛД, оптический выход которого связан с входом ВОК, выход которого оптически связан с первым портом НВО, второй порт которого оптически связан с фотоприемником, выход которого соединен с широкополосным СВЧ-усилителем, выход которого является выходом ДЗУ.

Последовательно соединены и оптически связаны третий порт НВО, ВОУ, ВС и четвертый порт НВО. Управляющие входы ВОК и ВОА подключены к первому и второму, соответственно, выходам БУ. Второй выход ДМ соединен с входом БУ.

Блок управления содержит последовательно соединенные широкополосный СВЧ-усилитель, функциональный преобразователь, первую линию задержки (ЛЗ) и первый формирователь импульсов (ФИ), выход которого является первым входом блока управления, а также вторую ЛЗ, второй и третий ФИ, первый и второй клю-

чи, сумматор, выход которого является вторым выходом блока управления. Вход второй ЛЗ подключен к выходу первой ЛЗ, а выход соединен с входом второго ФИ, выход которого объединен с входом третьего ФИ и управляющим входом второго ключа, на основной вход которого подано постоянное напряжение. Выход третьего ФИ соединен с управляющим входом первого ключа, на основной вход которого также подано постоянное напряжение. Первый вход сумматора соединен с выходом первого ключа, а второй вход – с выходом второго ключа.

В исходном состоянии в отсутствие запоминаемого (тиражируемого) сигнала напряжение на первом выходе блока управления обеспечивает минимальные потери оптического излучения в ВОК. Напротив, отсутствие напряжения на втором выходе блока управления позволяет получить коэффициент пропускания ВОА близким к нулю.

При появлении в момент t_0 на входе ДЗУ аналогового СВЧ-сигнала длительностью $\tau_{\text{и}}$, последний преобразуется в оптический сигнал, интенсивность которого изменяется в строгом соответствии с законом мгновенного изменения уровня радиосигнала. Линейный закон модуляции оптического излучения достигается благодаря использованию современных полупроводниковых инжекционных лазеров, допускающих прямую модуляцию излучения путем изменения тока наячки и имеющих линейную модуляционную характеристику. Далее через открытый ВОК модулированное оптическое излучение поступает на первый порт НВО. На выходе ДЗУ формируется 0-я копия радиосигнала. Одновременно в момент t_0 часть входного сигнала со второго выхода ДМ поступает на вход БУ, благодаря чему на выходах последнего появляются сигналы, управляющие дальнейшим состоянием ВОК и ВОА.

Сигнал управления $u_1(t)$ на первом выходе БУ исчезает с некоторой задержкой Δt после окончания входного сигнала. В результате фоновое излучение с выхода ЛД не поступает на первый порт НВО, начиная с временного момента $t=t_i+\Delta t$. Управляющий сигнал $u_2(t)$ на втором выходе БУ появляется в момент $t=t_0+\tau_i-\Delta t$ и представляет собой постоянное напряжение U_{2j} . Под действием указанного напряжения ВОА обеспечивает минимальное затухание оптического излучения в петле обратной связи.

Благодаря ВОК и ВОА из выходного излучения ЛД формируется световой

импульс длительностью τ_3 , постоянно циркулирующий по цепи обратной связи. Вследствие отсутствия на порте 1 НВО к моменту формирования 1-й копии оптического излучения в динамическом запоминающем устройстве не происходит накопления фоновых, амплитудных и дробовых составляющих шума. Лишь спонтанное излучение ВОУ, циркулируя по петле обратной связи с момента $t_0 + \tau_3$, приводит к увеличению интенсивности излучения на фотодиоде.

В момент $t=t_0+\tau_3-\Delta t$ на электрический вход ВОА воздействует напряжение $u_2(t)=U_{21}$ которое обеспечивает максимальное значение коэффициента передачи по замкнутой петле рециркуляции. В момент $t=t_0+\tau_3-\Delta t+T_1$ напряжение $u_2(t)=U_{22}$ на электрическом входе ВОА обеспечивает затухание оптического излучения, циркулирующего по петле обратной связи.

После формирования требуемого количества N копий радиосигнала в момент $t=t_0+\tau_3+\Delta t+T_1$ затухание ВОА снова принимает исходное значение.

Таким образом, благодаря наличию управляющего сигнала $u_2(t)$, воздействующего на ВОА, процесс запоминания входной информации разбивается на два цикла.

Начиная с момента $t=t_0+\tau_3-\Delta t+T_1$ затухание ВОА изменяется, начинается второй цикл запоминания информации. К этому моменту отношение сигнал/шум циркулирующей по замкнутому контуру динамического запоминающего устройства смеси сигнала и шума практически достигает своего предельного значения и в дальнейшем изменяется очень незначительно, что позволяет при во много раз увеличить время хранения информации во втором цикле запоминания по сравнению с первым.

Во втором цикле запоминания значения сигнала и шума последней m -й копии на входе динамического запоминающего устройства, сформированной в первом цикле, рассматриваются как исходные и адекватны соответственно величине сигнала и фонового шума в первом цикле.

Процесс запоминания информации заканчивается через время T_u . При этом на первом выходе БУ появляется напряжение $u_1(t)$, открывающее ВОК. На втором выходе БУ, напротив, напряжение $u_2(t)$ становится равным нулю, приводя к разрыву цепи обратной связи. В результате все функциональные элементы динамического

R U 2 2 1 0 1 2 1 C 1
R U 2 2 1 0 1 2 1 C 1

запоминающего устройства переходят в исходные состояния. При поступлении на вход новых данных описанный выше процесс запоминания информации повторяется.

Признаки прототипа, совпадающие с признаками заявляемого технического решения, следующие: последовательно соединенные делитель мощности, оптический передатчик с лазерным диодом, а также направленный волоконный ответвитель X-типа, волоконно-оптический усилитель, волоконно-оптическую линию задержки в виде отрезка волоконного световода, волоконно-оптический ключ и фотодетектор, выход которого соединен с входом основного широкополосного усилителя, выход которого является выходом устройства, а также блок управления, вход которого соединен с вторым выходом делителя мощности, а первый выход – с электрический входом волоконно-оптического ключа.

Данное устройство служит для организации динамической оперативной памяти аналоговых СВЧ-радиосигналов. Недостатками известного динамического запоминающего устройства является низкая идентичность формируемых копий.

Причины, препятствующие достижению требуемого технического результата, заключаются в том, что при организации динамической памяти радиосигналов используется рециркуляция сигнала с коэффициентом передачи по цепи обратной связи, отличающимся от 1 и непостоянным в течение всего цикла формирования копий входного радиосигнала.

Задача, на решение которой направлено изобретение, заключается в достижении возможности организации тиражирования импульсных СВЧ-радиосигналов на основе бинарной волоконно-оптической структуры в условиях накопления внутренних шумов устройства, влияния дисперсии волоконного световода (ВС) и произвольных моментов появления входных радиосигналов.

Технический результат заключается в повышении идентичности формируемых копий радиосигнала на выходе динамического запоминающего устройства.

В предлагаемом изобретении исключается рециркуляция сигнала, а все копии радиосигнала проходят через одинаковое количество портов НВО и соединений ВС, обеспечивая тем самым равные потери оптического излучения для всех копий. Неидентичность сформированных копий определяется только лишь потерями, обу-

RU 2210121 С1
RU 2210121 С2

словленными различной длиной световодов, используемых в волоконно-оптических линиях задержки.

Технический результат достигается тем, что в динамическое запоминающее устройство, с одевающее последовательно соединенные делитель мощности, оптический передатчик с лазерным диодом, а также направленный волоконный ответвитель X-типа, волоконно-оптический усилитель, волоконно-оптическую линию задержки в виде отрезка волоконного световода, волоконно-оптический ключ и фотодетектор, выход которого соединен с входом основного широкополосного усилителя, а также блок управления, вход которого соединен с вторым выходом делителя мощности, а первый выход с электрический выходом волоконно-оптического ключа, отличается тем, что в него дополнительно введены дополнительный широкополосный усилитель, разделительный направленный волоконный ответвитель Y-типа, суммирующий направленный волоконный ответвитель Y-типа, N-2 направленных волоконных ответвителей X-типа, N-1 волоконно-оптических линий задержки и электронный ключ, причем вход устройства является входом дополнительного широкополосного усилителя, выход которого подключен к входу делителя мощности, оптический выход лазерного диода через волоконно-оптический усилитель и волоконно-оптический ключ подключен к входному порту разделительного направленного волоконного ответвителя Y-типа, первый выходной порт которого соосно подключен к первому входному порту первого направленного волоконного ответвителя X-типа, третий выходной порт которого соосно подключен к первому входному порту второго направленного волоконного ответвителя X-типа, третий выходной порт j-го направленного волоконного ответвителя X-типа подключен к первому входному порту (j+1)-го направленного волоконного ответвителя X-типа, а третий входной порт последнего, (N-1)-го, направленного волоконного ответвителя X-типа соединен с первым входным портом суммирующего направленного волоконного ответвителя Y-типа, выходной порт которого оптически соединен с оптическим входом фотодетектора, причем второй выходной порт разделительного направленного волоконного ответвителя Y-типа через первую волоконно-оптическую линию задержки подключен к второму входному порту первого направленного волоконного ответвителя X-типа, четвертый выходной порт которого через вторую волоконно-оптическую линию задержки соосно соединен со

RU 2 2 1 0 1 2 1 C 1

вторым входным портом второго направленного волоконного ответвителя X-типа, четвертый выходной порт j-го направленного волоконного ответвителя X-типа через (j+1)-ю волоконно-оптическую линию задержки соосно подключен к второму входному порту (j+1)-го направленного волоконного ответвителя X-типа, а четвертый выходной порт последнего, (N-1)-го направленного волоконного ответвителя X-типа через последнюю, N-ю, волоконно-оптическую линию задержки соосно подключен к второму входному порту суммирующего направленного волоконного ответвителя Y-типа, причем второй выход блока управления соединен с управляющим входом электронного ключа, вход которого подключен к выходу основного широкополосного усилителя, а выход является выходом устройства.

Анализ существенных признаков аналогов, прототипа и заявляемого объекта выявил следующие существенные признаки для заявляемого объекта:

- введен дополнительный ПУ для уменьшения коэффициента шума ДЗУ;
- введен разделительный НВО Y-типа для подачи входного излучения непосредственно на первый порт и через первую ВОЛЗ на второй порт первого НВО X-типа;
- введены (N-2) НВО X-типа, благодаря которым суммируются излучения, действующие на первый и второй входные порты НВО; просуммированные излучения делятся между третьим и четвертым выходными портами НВО;
- введены (N-1) ВОЛЗ для обеспечения требуемого разнесения во времени копий радиосигналов, которыми промодулированы излучения на третьем и четвертом выходных портах НВО X-типа;
- введен суммирующий НВО Y-типа, благодаря которому на фотодетектор поступают излучения с последнего, (N-1)-го, НВО X-типа: с третьего выходного порта непосредственно и с четвертого выходного порта через последнюю, N-ю, ВОЛЗ;
- введен электронный ключ для управления последовательностью формируемых копий.

Таким образом, благодаря введению в динамическое запоминающее устройство бинарной волоконно-оптической структуры, состоящей из разделительного НВО Y-типа, (N-1) НВО X-типа, N ВОЛЗ и суммирующего НВО Y-типа, исключа-

ется репиркуляции сигнала и, тем самым, обеспечивается значительное повышение идентичности тиражируемых копий входного радиосигнала.

Доказательство наличия причинно-следственной связи между заявляемой совокупностью признаков и достигаемым техническим результатом приводится далее.

Сущность предлагаемого технического решения поясняется чертежами.

На фиг.1 представлена функциональная схема динамического запоминающего устройства с бинарной волоконно-оптической структурой, а на фиг.2 – эпюры, поясняющие принцип работы устройства.

На фиг.3 показана функциональная схема блока управления, а на фиг.4 – эпюры, поясняющие принцип его работы.

На фиг.5 приведены результаты расчетов потерь оптического излучения в бинарной волоконно-оптической структуре для последней копии радиосигнала при различном числе используемых волоконно-оптических линий задержки.

На фиг.6 представлены зависимости неидентичности формируемых в устройстве копий входного радиосигнала от числа формируемых копий при различных периодах следования копий.

На фиг.7 показана шумовая модель динамического запоминающего устройства с бинарной волоконно-оптической структурой.

На фиг.8 представлены зависимости спектральных плотностей мощности различных составляющих внутренних шумов устройства, пересчитанных на вход устройства, от значения интенсивности постоянной составляющей оптического излучения лазерного диода.

На фиг.9 приведена функциональная схема динамического запоминающего устройства с бинарной волоконно-оптической структурой в случае невозможности определения в блоке управления информации о моменте прихода и длительности входного радиосигнала, а на фиг.10 – зависимости спектральных плотностей мощности различных составляющих внутренних шумов устройства, пересчитанных на вход устройства, от значения интенсивности постоянной составляющей оптического излучения лазерного диода для этого случая.

На фиг.11 показана функциональная схема устройства динамической памяти (патент 4557552 США, МКИ³ G 02 B 5/172), где приняты следующие обозначения:

МТ – модулятор тока, ЛД – лазерный диод, ВС – волоконный световод, намотанный на барабан, ОС – оптический стержень, Л – линза, ПФМ – пространственный фильтр-маска, ФД – фотодиод.

На фиг.12 приведена функциональная схема запоминающего устройства (патент 4479701 США, МКИ³ G 02 B 5/172), где приняты следующие обозначения: НВО – направленный волоконный ответвитель, ВС – волоконный световод.

На фиг.13 представлена функциональная схема динамического оперативного запоминающего устройства с радиочастотной обратной связью (патент 2082280 РФ, МКИ⁶ Н04B10/00, G02B6/00, заявл. 05.06.95 №95108961/28, опубл. 20.06.97, БИ 17), где приняты следующие обозначения: К – ключ, ДМ – делитель мощности, СМ – сумматор мощности, ОП – оптический передатчик, ЛД – лазерный диод, ВС – волоконный световод, ФД – фотодетектор, ШУ – широкополосный усилитель, УА – управляемый аттенюатор, БУ – блок управления.

На фиг.14 показана функциональная схема динамического запоминающего устройства (патент 2149464 РФ, МКИ⁷ G11 C11/42, заявл. 19.01.1999 №99101673/09, опубл. 20.05.2000, БИ 14), где приняты следующие обозначения: ДМ – делитель мощности, ОП – оптический передатчик, ЛД – лазерный диод, ВОК – волоконно-оптический ключ, НВО – направленный волоконный ответвитель Х-типа, ВОУ – волоконно-оптический усилитель, ВС – волоконный световод, ВОА – волоконно-оптический аттенюатор, ФД – фотодетектор, ШУ – широкополосный усилитель, БУ – блок управления.

На фиг.15 приведены результаты расчетов неидентичности формируемых кодов для различных устройств динамической памяти радиосигналов.

Динамическое запоминающее устройство с бинарной волоконно-оптической структурой содержит (см. фиг.1) входной широкополосный усилитель ШУ 1, делитель мощности ДМ 2, передающий оптический модуль ПОМ, включающий в свой состав оптический передатчик ОП 3 с лазерным диодом ЛД 4, а также волоконно-оптический усилитель ВОУ 5, волоконно-оптический ключ ВОК 6, блок управления БУ 7, разделительный НВО Y-типа 8, (N-1) НВО X-типа 9-1, ..., 9-(N-1), суммирующий НВО Y-типа 10, N ВОЛЗ 11-1, ..., 11-N, фотодетектор ФД 12, выходной широкополосный усилитель ШУ 13 и электронный ключ ЭК 14.

Входом устройства является ШУ 1, выход которого подключен к входу ДМ 2, первый выход которого соединен с ОП 3 с ЛД 4, оптический выход которого соосно соединен с оптическим входом ВОУ 5, оптический выход которого подключен к оптическому входу ВОК 6, оптический выход которого соединен с входным портом разделительного НВО Y-типа 8, первый выходной порт которого соосно подключен к первому входному порту первого НВО X-типа 9-1, третий выходной порт которого соосно подключен к первому входному порту второго НВО X-типа 9-2. Третий выходной порт j-го НВО X-типа 9-j подключен к первому входному порту (j+1)-го НВО X-типа 9-(j+1), а третий выходной порт последнего НВО X-типа 9-(N - 1) соединен с первым входным портом суммирующего НВО Y-типа, выходной порт которого соединен с оптическим входом фотодетектора ФД 12. Второй выходной порт разделительного НВО Y-типа через первую ВОЛЗ 11-1 подключен ко второму входному порту первого НВО X-типа 9-1, четвертый выходной порт которого через вторую ВОЛЗ 11-2 соосно соединен со вторым входным портом второго НВО X-типа 9-2. Четвертый выходной порт j-го НВО X-типа 9-j через (j+1)-ю ВОЛЗ 11-(j+1) соосно подключен ко второму входному порту (j+1)-го НВО X-типа 9-(j+1). Четвертый выходной порт последнего НВО X-типа 9-(N-1) через последнюю ВОЛЗ 11-N соосно подключен ко второму входному порту суммирующего НВО Y-типа 10.

Второй выход ДМ 2 соединен с входом БУ 7, первый выход которого подключен к электрическому входу ВОК 6, а второй выход соединен с управляющим входом электронного ключа ЭК 14.

Выход ФД 12 подключен к входу выходного ШУ 13, выход ШУ 13 соединен с основным входом управляемого электронного ключа ЭК 14, выход которого является выходом устройства.

Блок управления БУ 7 содержит (см. фиг.3) последовательно соединенные широкополосный усилитель ШУ 15, вход которого является входом блока управления, формирователь импульсов ФИ 16, первый буферный каскад БК

17, выход которого является первым выходом блока управления, а также синхронизируемый тактовый генератор прямоугольных импульсов ТГ 18, вход которого соединен с выходом формирователя импульсов ФИ 16.

Выход задающего генератора подключен с тактовым входом регистра сдвига

RU 2210121 C1

RU 2210121 C1

РС 19, последовательно соединенного со вторым буферным каскадом БК 20, выход которого является вторым выходом блока управления. На параллельный информационный вход регистра сдвига РС 19 подается в цифровом виде информация для управления последовательностью формируемых копий.

Работает динамическое запоминающее устройство с бинарной волоконно-оптической структурой следующим образом (см. фиг.1 и фиг.2).

Динамические запоминающие устройства предназначены для формирования временной последовательности из $M+1$ копии

$$u_i(t) = K_i u_c(t - i \cdot \tau_{\text{зад}}), \quad i = \overline{0, M} \quad (1)$$

сложного радиосигнала длительностью τ_u

$$u_c(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } t < t_0 \text{ и } t > t_0 + \tau_u; \\ U_c \cdot m_c(t) \cdot \cos[\Phi_c(t)], & \text{при } t_0 \leq t \leq t_0 + \tau_u. \end{cases} \quad (2)$$

Параметр $K_i U_c$ определяет амплитуду i -й копии широкополосного СВЧ-радиосигнала с амплитудной $m_c(t)$ и/или угловой $\Phi_c(t)$ модуляцией. Выбор периода следования (времени задержки) копий $\tau_{\text{зад}} > \tau_u$ исключает возможность временного перекрытия отдельных копий.

Вариант $i=0$ в формуле (1) соответствует прямой передаче входного радиосигнала (2) на выход ДЗУ без временной задержки. В этом случае говорят о формировании в ДЗУ нулевой копии входного радиосигнала.

Принцип формирования копий входного радиосигнала в ДЗУ с бинарной ВОС заключается в следующем (см. фиг.1). Нулевая копия входного радиосигнала соответствует прямой передаче оптического излучения с входного порта разделительного НВО Y-типа 8 на выходной порт суммирующего НВО Y-типа 10, минуя все ВОЛЗ. Первая копия радиосигнала формируется благодаря ответвлению в разделительном НВО Y-типа 8 части оптического сигнала в первую ВОЛЗ 11-1 со временем задержки $\tau_{\text{зад}}$. С выхода первой ВОЛЗ 11-1 излучение поступает во второй входной порт первого НВО X-типа 9-1 и далее без задержки на выходной порт суммирующего НВО Y-типа 10.

При формировании второй копии излучаемый лазерным диодом ЛД 4 сигнал передается по цепи входной порт разделительного НВО Y-типа 8 – первый вы-

С 1
2 1 0 1 2 1
2 2 1 0 1 2 1
Р У

ходной порт разделительного НВО Y-типа 8 – первый входной порт НВО X-типа 9-1 – четвертый выходной порт НВО X-типа 9-1 – вторая ВОЛЗ 11-2 – второй входной порт НВО X-типа 9-2 – третий выходной порт НВО X-типа 9-2 и далее без задержки выходной порт суммирующего НВО Y-типа 10. Третья копия сигнала генерируется благодаря задержке промодулированного оптического излучения как в первой ВОЛЗ 11-1 так и во второй ВОЛЗ 11-2. Наконец, последняя, M-я копия входного радиосигнала проходит через все ВОЛЗ с общим временем задержки

$$M\tau_{\text{зад}} = (2^N - 1)\tau_{\text{зад}}$$

Блок управления БУ 7 работает следующим образом (см. фиг.3 и фиг.4). На вход блока управления со второго выхода делителя мощности ДМ 2 поступает входной сигнал $u_{\text{вх},\text{БУ}}(t)$ длительностью τ_y , который усиливается в широкополосном усилителе ШУ 15. С выхода усилителя усиленный радиосигнал $u_{\text{вх},\text{ФИ}}(t)$ подается на формирователь импульсов ФИ 16, на выходе которого в момент прихода радиосигнала формируется видеоимпульс длительностью τ_n . В качестве формирователя импульсов ФИ 16 может выступать пороговое устройство, срабатывающее при превышении входным сигналом некоторого уровня. Сформированный в ФИ 16 импульс через первый буферный каскад БК 17, предназначенный для согласования выхода формирователя импульсов с управляющим входом волоконно-оптического ключа ВОК 6, поступает на первый выход блока управления и образует управляющий сигнал $u_1(t)$. Под воздействием управляющего сигнала $u_1(t)$ волоконно-оптический ключ ВОК 6 открывается только в момент прихода сигнала и только на время его длительности, благодаря чему не допускается прохождение шумов входных каскадов устройства на его выход во время формирования копий входного радиосигнала.

С выхода формирователя импульсов ФИ 16 видеоимпульс поступает также на синхронизируемый тактовый генератор прямоугольных импульсов ТГ 18, который синхронизируется по переднему фронту видеоимпульса с выхода ФИ 16. Период генерируемых тактовым генератором ТГ 18 прямоугольных импульсов равен периоду задержки копий $\tau_{\text{зад}}$. С выхода генератора сигнал поступает на таймерный вход регистра сдвига РС 19, на информационный вход которого поступает цифровой код управления последовательностью формируемых копий (информация о не-

обходимости пропускания или непропускания электронным ключом ЭК 14 (см. фиг.1) той или иной сформированной копии радиосигнала). Данная информация преобразуется в сдвиговом регистре из параллельного вида в последовательный и формирует во втором буферном каскаде БК 20 управляющий сигнал $u_2(t)$, который поступает на второй выход блока управления, соединенный с управляющим входом электронного ключа ЭК 14. На фиг.4 показан случай, когда на выход устройства поступают все сформированные копии сигнала, кроме второй и третьей.

Таким образом, если на вход устройства с N ВОЛЗ в момент времени t поступает импульсный широкополосный СВЧ-радиосигнал (2) с длительностью τ_n , то на выходе ДЗУ в общем случае (когда электронный ключ ЭК 14 всегда находится в замкнутом состоянии) формируется временная последовательность из 2^N копий (1). Коэффициент K_i в формуле (1) определяет отношение амплитуды U_i i -й копии радиосигнала к амплитуде U_c входного радиосигнала (2).

Анализ функциональной схеме ДЗУ на основе бинарных волоконно-оптических структур (см. фиг.1) показывает, что при отсутствии управления последовательностью формируемых копий невозможно формирование любого заданного числа копий. Количество копий радиосигналов в этом случае может быть равно только 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1024 и т.д.

Направленные волноводные ответвители конструктивно представляют собой два световода, имеющих участок соприкосновения сердцевин. За счёт этого удается осуществить отведение части оптической энергии из одного ВС в другой.

Если на входной порт разделятельного НВО Y-типа НВО 8 подать оптический сигнал $J_{\text{нво.8.вх}}$, то на его втором и третьем выходных портах будут действовать оптические сигналы с интенсивностями:

$$\begin{aligned} J_{\text{нво.8.1}}(t) &= K_{\text{нво.8.1}} J_{\text{нво.8.вх}}(t) \cdot 10^{-0.1 \gamma_{\text{нво.8}}[\text{дБ}]}, \\ J_{\text{нво.8.2}}(t) &= K_{\text{нво.8.2}} J_{\text{нво.8.вх}}(t) \cdot 10^{-0.1 \gamma_{\text{нво.8}}[\text{дБ}]}. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь коэффициенты ответвления $K_{\text{нво.8.п}}$ определяют, какая часть интенсивности излучения поступает со входного порта в п-й порт в случае идеального НВО. Коэффициенты ответвления удовлетворяют условию $K_{\text{нво.8.1}} = 1 - K_{\text{нво.8.2}}$.

В реальных ответвителях всегда присутствуют потери световой энергии, ко-

торые выражаются в том, что суммарная интенсивность излучения на выходных портах НВО не совпадает с интенсивностью входного излучения. Указанные потери учитываются в формулах (3) параметром $\gamma_{\text{НВО},8}$.

При подаче на первый и второй входные порты k-го НВО X-типа НВО 9-k оптических сигналов с интенсивностями $J_{\text{НВО},9-k,1}$ и $J_{\text{НВО},9-k,2}$ на его третьем и четвертом выходных портах появляются оптические излучения с интенсивностями:

$$\begin{aligned} J_{\text{НВО},9-k,3}(t) &= [K_{\text{НВО},9-k,13}J_{\text{НВО},9-k,1}(t) + K_{\text{НВО},9-k,23}J_{\text{НВО},9-k,2}(t)] \cdot 10^{-0.1\gamma_{\text{НВО},9-k}\{\text{дБ}\}}, \\ J_{\text{НВО},9-k,4}(t) &= [K_{\text{НВО},9-k,14}J_{\text{НВО},9-k,1}(t) + K_{\text{НВО},9-k,24}J_{\text{НВО},9-k,2}(t)] \cdot 10^{-0.1\gamma_{\text{НВО},9-k}\{\text{дБ}\}}. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь коэффициенты ответвления $K_{\text{НВО},9-k,mn}$ определяют, какая часть интенсивности излучения поступает со m- порта в n-й порт в случае идеального НВО. Коэффициенты ответвления НВО X-типа всегда удовлетворяют условию $K_{\text{НВО},9-k,13} = 1 - K_{\text{НВО},9-k,14}$ и $K_{\text{НВО},9-k,23} = 1 - K_{\text{НВО},9-k,24}$.

Суммирующий НВО Y-типа 10 описывается следующим уравнением:

$$J_{\text{НВО},10,3}(t) = [J_{\text{НВО},10,1}(t) + J_{\text{НВО},10,2}(t)] \cdot 10^{-0.1\gamma_{\text{НВО},10}\{\text{дБ}\}}. \quad (5)$$

Волоконно-оптическая линия задержки представляет отрезок волоконного световода длиной L, обеспечивающего задержку проходящего сигнала на заданное время. Учитывая, что типовое значение погонной задержки ВС составляет примерно 5 мкс/км, длина отрезка ВС для j-й ВОЛЗ 11-j в первом приближении составляет:

$$L_{\text{волз},11-j}[\text{км}] \approx 0.1 \cdot 2^j \tau_{\text{зад}}[\text{мкс}], \quad j = \overline{1, N}. \quad (6)$$

Следует отметить, что преимуществом ДЗУ с бинарной ВОС над ДЗУ рециркуляционного типа является то, что все копии радиосигнала проходят через одинаковое количество портов НВО и соединений ВС, обеспечивая тем самым равные потери оптического излучения для всех копий. Неидентичность сформированных копий определяется лишь потерями, обусловленными различной длиной световодов, используемых в ВОЛЗ. Так, нулевая копия i=0 сигнала формируется без прохождения оптического излучения через какую-либо ВОЛЗ. Это обеспечивает минимальные потери сигнала. Последняя копия (i=M), напротив, должна пройти через все ВОЛЗ. Потери сигнала здесь будут наибольшими.

Общие потери радиосигнала в ДЗУ при формировании i-й копии

$$\alpha_i [\text{дБ}] = \alpha_{pc} [\text{дБ}] + \alpha_{\text{проб}} [\text{дБ}] + 2\alpha_{\text{вос.}i} [\text{дБ}], \quad (7)$$

определяются потерями мощности радиосигнала α_{pc} в радиотракте, потерями в цикле преобразования "радиосигнал–оптическое излучение–радиосигнал" $\alpha_{\text{проб}}$ и потерями интенсивности оптического излучения в ВОС $\alpha_{\text{вос.}i}$. Множитель 2 при $\alpha_{\text{вос.}i}$ в формуле (7) учитывает тот факт, что электрическая мощность радиосигнала на выходе фотодетектора пропорциональна квадрату интенсивности оптического излучения.

Анализ функциональной схемы ДЗУ с бинарной ВОС (фиг.1) показывает, что источниками потерь мощности СВЧ-сигнала в радиотракте являются СВЧ-разъёмы $\alpha_{\text{разъёмы}}$ и рассогласование импедансов $\alpha_{\text{согл}}$ функциональных узлов и потери в электронном ключе ЭК 14 $\alpha_{\text{ЭК}}$.

В ДЗУ с бинарной ВОС используется десять СВЧ-разъёмов: входные и выходные разъёмы широкополосных усилителей ШУ 1 и ШУ 13, делителя мощности ДМ 2 и электронного ключа ЭК 14, входной разъём ПОМ и выходной разъём ФД. Типовое значение потерь радиосигнала на разъёме составляет 0,1 дБ. Таким образом, суммарные потери, вносимые СВЧ-разъёмами, оцениваются в $\alpha_{\text{разъёмы}} \approx 1$ дБ.

Последовательное соединение функциональных узлов проектируемого ДЗУ по СВЧ-сигналу для минимизации энергетических потерь требует выполнения условия согласования, при котором мощность источника сигнала полностью поглощается нагрузкой. Согласование обеспечивается равенством входных и выходных импедансов используемых СВЧ-модулей.

Потери мощности в случае рассогласования импедансов во входном радиотракте определяются соотношением

$$\alpha_{\text{согл.вх}} [\text{дБ}] = -10 \lg [(1 - \Gamma_1 \Gamma_2) \cdot (1 - \Gamma_3 \Gamma_4)],$$

где $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4$ – коэффициенты отражения соответственно входного широкополосного усилителя ШУ 1 по выходу, делителя мощности ДМ 2 по входу, делителя мощности ДМ 2 по выходу, ПОМ по входу.

Потери на рассогласование в выходном радиотракте равны:

$$\alpha_{\text{соглых}} [\text{дБ}] = -10 \lg [(1 - \Gamma_5 \Gamma_6) \cdot (1 - \Gamma_7 \Gamma_8)],$$

где $\Gamma_5, \Gamma_6, \Gamma_7, \Gamma_8$ – коэффициенты отражения соответственно фотодетектора ФД 12 по выходу, выходного широкополосного усилителя ШУ 13 по входу, выходного широкополосного усилителя ШУ 13 по выходу, электронного ключа ЭК 14 по входу.

Коэффициенты отражения Γ однозначно определяются приводимыми в технических характеристиках функциональных узлов значениями коэффициентов стоячей волны напряжения КСВН:

$$\Gamma = \frac{\text{КСВН} - 1}{\text{КСВН} + 1}.$$

Коэффициентам КСВН широкополосных усилителей, делителя мощности, ПОМ, фотодетектора, электронного ключа, равным 2, соответствует коэффициент отражения $\Gamma = (2-1)/(2+1) = 1/3$. При этом потери мощности радиосигнала за счёт рассогласования во входном и в выходном радиотрактах составят:

$$\alpha_{\text{соглых}} = \alpha_{\text{соглых}} = -10 \lg \left[\left(1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{3} \right) \cdot \left(1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{3} \right) \right] \approx 1,0 \text{ дБ.}$$

Потери в замкнутом электронном ключе ЭК 14 $\alpha_{\text{ЭК}}$ зависят от типа используемого ключа и составляет около 1 дБ.

Таким образом, общие потери мощности радиосигнала составляют

$$\alpha_{\text{pc}} = \alpha_{\text{соглых}} + \alpha_{\text{разъёмы}} + \alpha_{\text{соглых}} + \alpha_{\text{ЭК}} \approx 1+1+1+1=4 \text{ дБ.}$$

Использование в ДЗУ волоконно-оптических линий задержки требует преобразования входного СВЧ-сигнала в оптическое излучение посредством модуляции излучения передающего оптического модуля по интенсивности радиосигналом.

Параметром, характеризующим преобразование радиосигнала в излучение оптического диапазона, является крутизна преобразования (дифференциальная квантовая эффективность источника излучения) $S_{\text{ипш}}$, определяемая в соответствии с ваттамперной характеристикой излучателя и измеряемая в Вт/А.

Коэффициент преобразования интенсивности оптического излучения, падающей на фоточувствительную площадку фотодетектора $J_{\text{ФД}}$, в фототок $I_{\text{ФД}}$ (электри-

ческий сигнал) характеризуется токовой чувствительностью $\varepsilon_{\text{ФД}}$ фотодетектора, которая измеряется в А/Вт и обычно указывается в паспортных данных.

Потери на преобразование радиосигнала в оптическое излучение в передающем оптическом модуле со входным сопротивлением $R_{\text{вх.ном}}$ и на преобразование оптического излучения в радиосигнал в фотоприёмном модуле с сопротивлением нагрузки фотодетектора $R_{\text{н.ФД}}$ могут быть рассчитаны по формуле

$$\alpha_{\text{преб}} [\text{дБ}] = -10 \cdot \lg \left(S_{\text{нлл}}^2 \cdot \varepsilon_{\text{ФД}}^2 \cdot \frac{R_{\text{н.ФД}}}{R_{\text{вх.ном}}} \right)$$

При $S_{\text{нлл}} = 75 \text{ мВт/А}$, $\varepsilon_{\text{ФД}} = 0,35 \text{ А/Вт}$ и $R_{\text{вх.ном}} = R_{\text{н.ФД}} = 50 \text{ Ом}$ потери на преобразование радиосигнала в оптическое излучение составляют:

$$\alpha_{\text{преб}} = -10 \cdot \lg \left[(0,075 \cdot 0,35)^2 \frac{50}{50} \right] \approx 31,6 \text{ дБ.}$$

Основными источниками потерь интенсивности оптического излучения являются:

- ввод оптического излучения лазера в волоконный световод;
- потери в замкнутом волоконно-оптическом ключе;
- потери сигнала, вносимые НВО;
- потери сигнала, возникающие за счёт оптических соединений;
- распространение оптического излучения в волоконно-оптических линиях задержки;
- вывод оптического излучения из волоконного световода.

При оценке эффективности ввода оптического излучения в волоконный световод необходимо учитывать:

- интенсивность оптического излучения $J_{\text{нлл}}$ лазера передающего оптического модуля;
- диаграмму направленности оптического излучения передающего оптического модуля, как фактор m пространственного распределения излучения источника;
- числовую апертуру волоконного световода NA ;
- площадь сердцевины волоконного световода S_c ;
- площадь излучающей площадки источника излучения $S_{\text{нлл}}$.

С учётом этого интенсивность $J_{\text{пом}}$ оптического излучения ИПЛ, введённого в волоконный световод ПОМ, определяется выражением

$$J_{\text{пом}} = J_{\text{ИПЛ}} \left(\frac{m+1}{2} \right) \cdot \left(\frac{S_c}{S_{\text{ИПЛ}}} \right) \cdot NA^2.$$

Обусловленные вводом в волоконный световод потери интенсивности оптического излучения составят

$$\alpha_{\text{ввод}}[\text{дБ}] = 10 \cdot \lg \left(\frac{J_{\text{ИПЛ}}}{J_{\text{пом}}} \right).$$

Отметим, что для модулей ПОМ-13, ПОМ-13М и ПОМ-19 в справочных данных даётся введённая в волоконный световод интенсивность оптического излучения. В этом случае интенсивность $J_{\text{пом}}[\text{дБм}] = J_{\text{ИПЛ}}[\text{дБм}] - \alpha_{\text{ввод}}[\text{дБ}]$ уже учитывает потери на ввод в волоконный световод оптического излучения лазера.

Потери оптического излучения в замкнутом волоконно-оптическом ключе $\alpha_{\text{вок}}$ определяются типом используемого ВОК и составляют около 2 дБ для электронно-оптического ключа.

Собственные потери оптического излучения в световодах обусловлены технологией производства волоконных световодов и указываются в технических характеристиках. Минимальными собственными потерями интенсивности оптического излучения обладают одномодовые волоконные световоды типа кварц-кварц, рабочая длина волн которых составляет $\lambda=1,55 \text{ мкм}$. Типичное значение погонного ослабления (потерь) оптического излучения для данного типа ВС отечественного производства составляет $\Gamma_{\text{вс}}=0,2 \text{ дБ/км}$.

Отрезок ВС для j -й ВОЛЗ 11- j длиной $L_{\text{волз.11-}j}$ будет обладать потерями

$$\alpha_{\text{волз.11-}j}[\text{дБ}] = \Gamma_{\text{вс}}[\text{дБ/км}] \cdot L_{\text{волз.11-}j}[\text{км}].$$

С учётом формулы (6) суммарные потери на распространение оптического излучения в волоконных световодах при формировании i -й копии радиосигнала определяются выражением

$$\alpha_{\text{вс.}i}[\text{дБ}] \approx 0,2\Gamma_{\text{вс}}[\text{дБ/км}] \cdot i\tau_{\text{зад}}[\text{мкс}], i = \overline{0, M}. \quad (10)$$

Заметим, что потери в бинарной ВОС зависят от текущего номера i формируемой копии радиосигнала при заданном количестве ВОЛЗ N.

Потери оптического излучения в НВО возникают из-за деления сигнала в разделяльном НВО Y-типа 8, из-за деления сигнала в НВО X-типа 9-1...9-(N-1), а также потерь оптического сигнала на рассеивание при прохождении всех (N+1) НВО. В случае, когда коэффициенты деления во всех ответвителях X-типа и в разделяльном ответвителе Y-типа одинаковы и равны $K_{\text{НВО}} = 0,5$ ($\approx -3 \text{ dB}$), а также потери $\gamma_{\text{НВО}}$ во всех ответвителях одинаковы, суммарные потери оптического излучения в НВО составят:

$$\alpha_{\text{НВО}} [\text{dB}] = -N \cdot K_{\text{НВО}} [\text{dB}] + (N + 1) \cdot \gamma_{\text{НВО}} [\text{dB}]. \quad (11)$$

Потери сигнала, возникающие за счёт оптических соединений в ВОС, могут быть найдены по формуле:

$$\alpha_{\text{сод}} [\text{dB}] = 4\alpha_{\text{конн}} [\text{dB}] + 2(N + 1)\alpha_{\text{НВО-вс}} [\text{dB}], \quad (12)$$

где $\alpha_{\text{конн}}$ – потери в одном разъемном оптическом коннекторе;

$\alpha_{\text{НВО-вс}}$ – потери на соединение порта НВО с волоконным световодом.

Следует отметить, что оптические соединения выхода ПОМ с входом ВОУ 5, выхода ВОУ 5 с оптическим входом ВОК 6, выхода ВОК 6 с входным портом разделяльного НВО Y-типа 8, выходного порта суммирующего НВО Y-типа 10 с выходом фотодетектора ФД 12 выполняются разъемными с помощью оптических коннекторов с потерями на одном коннекторе $\alpha_{\text{конн}}$, не превышающими 0,2...0,3 dB.

Соединение волоконного световода с портами НВО выполняются неразъемными (методами сплавления или склеивания).

Конструктивные требования к волоконно-оптическим линиям задержки радиосигналов предполагают наматывание волоконного световода на катушку диаметром $D_{\text{кат}}$. Кольцевой изгиб волоконного световода вызывают дополнительные потери интенсивности оптического излучения в ВС.

Если потери на один виток составляют $\alpha_{\text{виток}}$, то потери интенсивности оптического излучения в катушке j-й ВОЛЗ 11-j составят

$$\alpha_{\text{кат},j}[\text{дБ}] \approx 2^j \cdot 10^5 \frac{\tau_{\text{зад}}[\text{мкс}]}{\pi D_{\text{кат}}[\text{мм}]} \alpha_{\text{внток}}[\text{дБ}].$$

Суммарные потери в кольцевых изгибах волоконных световодов при формировании i-й копии радиосигнала определяются выражением

$$\alpha_{\text{кнг},i}[\text{дБ}] \approx 2 \cdot 10^5 \cdot i \cdot \frac{\tau_{\text{зад}}[\text{мкс}]}{\pi D_{\text{кат}}[\text{мм}]} \alpha_{\text{внток}}[\text{дБ}], i = \overline{0, M}. \quad (13)$$

Использование волоконного световода с относительно малым диаметром сердцевины по отношению к фоточувствительной площадке фотоприёмника позволяет не учитывать потери интенсивности оптического излучения на вывод оптического излучения из бинарной волоконно-оптической структуры в фотодетектор.

Общие потери интенсивности оптического излучения при формировании i-й копии радиосигнала составляют

$$\alpha_{\text{вос},i}[\text{дБ}] = \alpha_{\text{ввод}}[\text{дБ}] + \alpha_{\text{вок}}[\text{дБ}] + \alpha_{\text{вс},i}[\text{дБ}] + \alpha_{\text{изг},i}[\text{дБ}] + \alpha_{\text{нво}}[\text{дБ}] + \alpha_{\text{сод}}[\text{дБ}]. \quad (14)$$

На фиг.5 приведены данные о потерях оптического излучения $\alpha_{\text{вос},M}$ для последней копии радиосигнала в зависимости от количества N используемых ВОЛЗ. Расчёты проведены по формулам (10)-(14) при следующих исходных данных: $\tau_{\text{зад}}=100 \text{ нс}$, $K_{\text{нво}}=-3 \text{ дБ}$, $\gamma_{\text{нво}}=0,1 \text{ дБ}$, $\Gamma_{\text{вс}}=0,22 \text{ дБ/км}$, $\alpha_{\text{вок}}=2 \text{ дБ}$, $\alpha_{\text{ввод}}=4,3 \text{ дБ}$, $D_{\text{кат}}=250 \text{ мм}$, $\alpha_{\text{внток}}=0,0001 \text{ дБ}$, $\alpha_{\text{конк}}=0,2 \text{ дБ}$, $\alpha_{\text{нво-вс}}=0,15 \text{ дБ}$.

Из фиг.5 видно, что при $N < 13$ основной вклад в ослабление сигнала вносят потери в НВО $\alpha_{\text{нво}}$, а при $N > 13$ основными факторами ослабления сигнала становятся его затухание в ВС ВОЛЗ $\alpha_{\text{вс},M}$ и потери в кольцевых изгибах волокна $\alpha_{\text{изг},M}$.

Проведённый анализ показывает, что определяющими потерями в ДЗУ являются потери в цикле преобразования "радиосигнал—оптическое излучение—радиосигнал" $\alpha_{\text{преоб}}$ и потери интенсивности оптического излучения в ВОС $\alpha_{\text{вос},i}$ при формировании i-й копии радиосигнала.

Пусть на вход ДЗУ (см. фиг.1) в момент времени t_0 воздействует одиночный широкополосный СВЧ-радиосигнал (2) длительностью τ_y . Напряжение на входе

ПОМ $u_{\text{вх.пом}}(t)$ связано с напряжением входного сигнала $u_c(t)$ устройства соотношением

$$u_{\text{вх.пом}}(t) = K_{\text{шУ.вх}} K_{\text{дм.1}} u_c(t) = U_{\text{вх.пом}} m(t) \cos \Phi(t),$$

где $K_{\text{шУ.вх}}$ – коэффициент усиления напряжения входного широкополосного усилителя ШУ 1 с учетом потерь радиосигнала на СВЧ-разъемах;

$K_{\text{дм.1}}$ – коэффициент передачи делителя мощности с входа на первый выход (см. фиг. 1) с учетом потерь радиосигнала на СВЧ-разъемах.

Применение полупроводникового лазера (ИПЛ), излучающего на рабочей длине волны λ , допускает непосредственную модуляцию интенсивности оптического излучения $J_{\text{пом}}(t)$ простым изменением тока накачки

$$i_n(t) = u_{\text{вх.пом}}(t) / R_{\text{вх.пом}} = I_n m(t) \cos \Phi(t).$$

Здесь $R_{\text{вх.пом}}$ представляет реальную часть входного сопротивления ПОМ, а $I_n = U_{\text{вх.пом}} / R_{\text{вх.пом}}$ – амплитуду тока накачки лазера в отсутствии амплитудной модуляции радиосигнала.

Характерной особенностью зависимости излучения инжекционного полупроводникового лазера $J_{\text{нл}}(t)$ от тока накачки $i_n(t)$ является наличие порогового значения $I_{\text{нл.пор}}$. При выборе постоянного тока смещения ПОМ $I_{\text{n.см}}$, удовлетворяющего условию

$$I_{\text{n.см}} - I_{\text{нл.пор}} > I_{\text{n макс}},$$

справедливо соотношение:

$$J_{\text{нл}}(t) = J_{\text{нл.0}} + J_{\text{нл.с}}(t). \quad (15)$$

Первое слагаемое в формуле (15) $J_{\text{нл.0}} = S_{\text{нл}} I_{\text{n.см}}$ представляет постоянную составляющую интенсивности оптического излучения лазера в отсутствии радиосигнала.

Информация о входном сигнале заключена во втором слагаемом формулы (15) $J_{\text{нл.с}}(t) = S_{\text{нл}} I_n m(t) \cos \Phi(t)$.

Глубина модуляции интенсивности может быть рассчитана по формуле:

$$m = \frac{J_{\text{н.см}}}{J_0} = \frac{S_{\text{нпн}} I_B}{S_{\text{нпн}} (I_{\text{н.см}} - I_{\text{нпор}})} = \frac{I_B}{I_{\text{н.см}} - I_{\text{нпор}}}.$$

Обусловленные вводом в волоконный световод потери интенсивности оптического излучения равны $\alpha_{\text{ввод}}$. При этом $J_{\text{пом}}(t)[\text{дБ}] = J_{\text{нпн}}(t)[\text{дБ}] - \alpha_{\text{ввод}}[\text{дБ}]$.

Следует отметить, что в общем случае в качестве фотодетектора ФД 12 может выступать фотоприемный модуль (ФПМ), состоящий из непосредственно фотодетектора какого-либо типа (pin-фотодиод, лавинный фотодиод, фототранзистор и т.п.) и встроенного широкополосного усилителя с коэффициентом усиления напряжения $K_{\text{шп.фпм}}$.

В соответствии с формулой (13) интенсивность сигнальной составляющей светового потока на фотодетекторе при формировании i -й копии радиосигнала равна

$$J_{\text{фд.с}}(t - i\tau_{\text{зад}})[\text{дБм}] = J_{\text{нпн.с}}(t)[\text{дБм}] + K_{\text{вог}}[\text{дБ}] + K_{\text{вок}}[\text{дБ}] - \alpha_{\text{вос.и}}[\text{дБ}],$$

где $K_{\text{вог}}$ – коэффициент передачи интенсивности оптического излучения волокно-оптическим усилителем ВОУ 5.

Радиосигнал на выходе фотоприёмного модуля

$$u_{\text{вых.фпм}}(t - i\tau_{\text{зад}}) = K_{\text{шп.фпм}} \varepsilon_{\text{фд}} J_{\text{фд.с}}(t - i\tau_{\text{зад}}) R_{\text{нфд}}, \quad (16)$$

где $K_{\text{шп.фпм}}$ – коэффициент усиления напряжения внутренним усилителем ФПМ.

Из соотношения (16) следует, что переменная составляющая напряжения на выходе ДЗУ в момент времени $t \in [t_0 + i\tau_{\text{зад}}, t_0 + \tau_{\text{и}} + i\tau_{\text{зад}}]$ повторяет по форме входной широкополосный радиосигнал (2) с задержкой по времени на величину $i\tau_{\text{зад}}$:

$$\begin{aligned} u_{\text{вых}}(t - i\tau_{\text{зад}}) &= K_{\text{у.вых}} K_{\text{ЭК}} u_{\text{вых.фпм}}(t - i\tau_{\text{зад}}) = \\ &= K_{\text{у.вых}} K_{\text{ЭК}} \varepsilon_{\text{фд}} J_{\text{фд.с}}(t - i\tau_{\text{зад}}) R_{\text{в.фд}} K_{\text{шп.фпм}}, \end{aligned}$$

где $K_{\text{шп.вых}}$ – коэффициент усиления напряжения выходного широкополосного усилителя ШУ 13 с учетом потерь радиосигнала на СВЧ-разъемах;

$K_{\text{ЭК}}$ – коэффициент передачи электронного ключа ЭК 14 в замкнутом состоянии с учетом потерь радиосигнала на СВЧ-разъемах.

Мощность радиосигнала (2) на входном сопротивлении $R_{вх.дзу}$ ДЗУ (входном сопротивлении входного широкополосного усилителя ШУ 1 на фиг.1) равна

$$P_c = U_c^2 / 2R_{вх.дзу}.$$

При расчёте энергетических параметров ДЗУ из-за большого динамического диапазона изменений уровня входного радиосигнала удобно пользоваться логарифмическими единицами, переход к которым позволяет свести основные расчеты мощностей радиосигналов к операциям сложения и вычитания. В качестве нулевого уровня интенсивности (мощности) принято значение $I_0=1 \text{ мВт}$ ($P_0=1 \text{ мВт}$), которое примерно соответствует максимальной интенсивности оптического излучения полупроводникового лазера. Тогда текущей интенсивности I или мощности P будет соответствовать уровень

$$I[\text{дБм}] = 10 \cdot \lg\left(\frac{I}{I_0}\right) = 10 \cdot \lg\left(\frac{I}{1 \text{ мВт}}\right) \quad \text{или} \quad P[\text{дБм}] = 10 \cdot \lg\left(\frac{P}{P_0}\right) = 10 \cdot \lg\left(\frac{P}{1 \text{ мВт}}\right).$$

Если на вход устройства в момент времени $t \in [t_0, t_0 + \tau_n]$ воздействует радиосигнал (2) мощностью P_c , то в момент времени $t \in [t_0 + i\tau_{\text{зад}}, t_0 + \tau_n + i\tau_{\text{зад}}]$ на выходе устройства будет присутствовать i -я копия (1) радиосигнала мощностью

$$P_i[\text{дБм}] = P_c[\text{дБм}] + K_{\text{р.шу.вх}}[\text{дБ}] + K_{\text{р.дм.1}}[\text{дБ}] + 2K_{\text{вых}}[\text{дБ}] - \alpha_i[\text{дБ}] + K_{\text{р.шу.фпм}}[\text{дБ}] + K_{\text{р.шу.вых}}[\text{дБ}] - \alpha_{\text{эк}}[\text{дБ}], \quad (17)$$

где $K_{\text{р.шу.вх}}$, $K_{\text{р.дм.1}}$, $K_{\text{р.шу.фпм}}$, $K_{\text{р.шу.вых}}$ – коэффициенты усиления мощности входного широкополосного усилителя ШУ 1, делителя мощности ДМ 2, усиительного каскада ФПМ, широкополосного усилителя ШУ 13 соответственно.

Выражение (17) удобно представить в виде:

$$P_i[\text{дБм}] = P_0[\text{дБм}] + K_0[\text{дБ}] - \Delta\alpha_i[\text{дБ}],$$

где K_0 – коэффициент, равный отношению мощности P_0 нулевой копии радиосигнала (принимаемой без задержки) к мощности P_c входного радиосигнала

$$(2): K_0[\text{дБ}] = K_{\text{р.шу.вх}}[\text{дБ}] + K_{\text{р.дм.1}}[\text{дБ}] + 2K_{\text{вых}}[\text{дБ}] + K_{\text{р.шу.фпм}}[\text{дБ}] + K_{\text{р.шу.вых}}[\text{дБ}] - \alpha_{pc}[\text{дБ}] - \alpha_{\text{проб}}[\text{дБ}] - 2\alpha_{\text{ввод}}[\text{дБ}] - 2\alpha_{\text{вок}}[\text{дБ}] - 2\alpha_{\text{сосд}}[\text{дБ}]$$

Ослабление мощности i -й копии относительно мощности нулевой копии

диосигнала оценивается выражением

$$\Delta\alpha_i[\text{дБ}] = P_0[\text{дБм}] - P_i[\text{дБм}].$$

С учётом соотношений (7), (10), (13) и (14) находим

$$\Delta\alpha_i[\text{дБ}] = 2i \cdot (\alpha_{\text{вс},1}[\text{дБ}] + \alpha_{\text{изг},1}[\text{дБ}]), \quad i = \overline{1, M}. \quad (18)$$

Вводимый параметр (18) может быть использован для характеристики неидентичности по мощности копий радиосигнала в пределах формируемой последовательности $i = \overline{1, M}$

$$\Delta\alpha_M[\text{дБ}] = 2M \cdot (\alpha_{\text{вс},1}[\text{дБ}] + \alpha_{\text{изг},1}[\text{дБ}]) = M \cdot \Delta\alpha_1. \quad (19)$$

Здесь множитель 2 имеет тот же смысл что и в формуле (7) при слагаемом $\alpha_{\text{вс},i}$.

Как следует из формулы (19), неидентичность M сформированных копий радиосигнала $\Delta\alpha_M$ в ДЗУ с бинарной ВОС может быть рассчитана через потери за счёт затухания оптического излучения в световоде ВОЛЗ $\alpha_{\text{вс},1}$ и конструктивные потери на изгиб $\alpha_{\text{изг},1}$ во время генерации 1-й копии радиосигнала.

Графическая зависимость (18) показана на фиг.6. Исходными данными для расчётов служили погонное затухание оптического излучения в ВС $\Gamma_{\text{вс}} = 0,2 \text{ дБ/км}$, потери на один виток $\alpha_{\text{виток}} = 10^{-4} \text{ дБ}$ и диаметр $D_{\text{кат}} = 250 \text{ мм}$ кольцевого изгиба волоконного световода в катушке. Значения временной задержки $\tau_{\text{зад}}$ изменялись в пределе от 50 до 200 нс с шагом в 50 нс.

В случае формирования 15-й копии с периодом задержки 100 нс (использование четырех ВОЛЗ) неидентичность копий составит

$$\Delta\alpha_{15} = 2 \cdot 15 \cdot (0,004 + 0,0025) \approx 0,2 \text{ дБ}.$$

Из фиг.6 можно заключить, что амплитуда сформированных копий монотонно убывает с увеличением номера копии. Мощность каждой последующей сформированной копии радиосигнала на выходе ДЗУ будет отличаться от предыдущей при $\tau_{\text{зад}} = 100 \text{ нс}$ на 0,013 дБ, а при $\tau_{\text{зад}} = 200 \text{ нс}$ на 0,026 дБ.

Проведённый анализ позволяет заключить, что главным преимуществом ДЗУ на бинарной ВОС является высокая идентичность копий. В случае формирования

15-ти копий (время задержки одной копии $\tau_{зад} = 100$ нс) разница в мощностях нулевой и последней копий радиосигнала составляет около 0,2 дБ.

Полученные соотношения (15)-(19) позволяют произвести энергетический расчёт параметров ДЗУ радиосигналов.

Чувствительность ДЗУ радиосигналов определяется мощностью внутренних шумов. Для расчёта величины полного шума в устройстве необходимо учитывать как волновые флюктуации, так и квантовые эффекты. Поэтому необходимо оценить вклад, вносимый во внутренние шумы всеми элементами ДЗУ радиосигналов.

Шумовая модель ДЗУ с бинарной ВОС, на которой отмечены шумовые источники, действующие в устройстве, показана на фиг.7.

В радиотракте учитываются источники тепловых шумов входного и выходного широкополосных усилителей $u_{ш.шу.вх}(t)$ и $u_{ш.шу.вых}(t)$, а также тепловые шумы широкополосного усилителя фотоприемного модуля $u_{ш.шу.фпм}(t)$. Данные источники шумов описываются классическими соотношениями.

Шумовые свойства волоконно-оптического усилителя характеризуются собственными дробовыми шумами, представляющими собой усиленное спонтанное излучение активного элемента $j_{сп.кл.}(t)$.

К шумам, связанным с фотоприёмным устройством, отнесены шумы темнового тока $u_{ш.темв.т.}(t)$, амплитудные $u_{ш.амп.т.}(t)$ и дробовые шумы $u_{ш.др.т.}(t)$.

Шумы темнового тока фотоприёмного устройства обусловлены тем, что даже в отсутствии на входе фотодетектора оптического излучения на его нагрузке выделяется шумовой сигнал, обусловленный протеканием так называемого темнового тока.

Амплитудные шумы ИПЛ можно разделить на два вида: собственные шумы ИПЛ и шумы модового распределения, или токового распределения.

Собственные шумы ИПЛ вызваны статистическими процессами квантования внутри резонатора. Один из источников шума, известного как дробовый шум, вызван током инжекции. Другие шумы возникают из-за спонтанной рекомбинации носителей внутри активного слоя и статистической природы поглощения, рассеяния и процесса вынужденной эмиссии. Уровень собственных шумов и ширина линии излучения индивидуальной моды связаны между собой квантовой природой

процессов, протекающих в активной зоне ИПЛ – чем шире линия излучения моды, тем больше амплитудные шумы ИПЛ и наоборот. Поэтому если в статическом режиме работы ИПЛ с ростом мощности излучения уменьшается ширина линии излучения отдельной моды и уменьшается уровень амплитудных шумов ИПЛ, то в динамическом режиме работы ИПЛ при уширении линии излучения моды, за счет флуктуации количества носителей в процессе модуляции, происходит увеличение уровня амплитудных шумов.

Шумы модового распределения появляются вследствие флуктуации между различными излучающими модами. Они отсутствуют, когда лазер работает (генерирует) в абсолютно одномодовом режиме. Если в лазерном излучении присутствуют малое число мод, то шумы модового распределения достигают своего максимального значения, потому что общая плотность фотонов распределена между этими модами, а небольшое возмущение может вызвать передачу значительного количества энергии между ними. Следовательно величина спектрального контраста ИПЛ в статическом одномодовом режиме и область его изменения в динамическом режиме определяют уровень шума модового распределения ИПЛ.

Связывая совокупный уровень амплитудного шума ИПЛ в динамическом режиме с характером изменения спектрального состава излучения, можно прийти к выводу о целесообразности и необходимости использования в сигнальных процессорах только ИПЛ с частотно-селективными структурами.

В волоконной технике амплитудный шум ИПЛ принято определять как относительный шум интенсивности RIN на выходе фотодетектора, который связан с излучением ИПЛ. Относительный шум интенсивности резко уменьшается по мере превышения рабочего тока инакачки над пороговым. Для отечественных передающих оптических модулей значения RIN лежат в пределах $-130\ldots-150$ дБ/Гц.

На амплитудные шумы ИПЛ значительное влияние также оказывает внешняя оптическая связь, возникающая из-за отражения излучения от неоднородностей в ВС, разъёмов, фотоприёмников и т.п. Для уменьшения влияния данных факторов на шумовые и спектральные характеристики ИПЛ, на выходе излучателя необходимо использовать оптические изоляторы и методы, устраняющие отражение от фотокатода фотодетектора и оптических разъемов (например, просветление). Использование оптических изоляторов на 30 дБ уменьшает световой поток, попада-

дающий в ПОМ из ВС.

Заметим, что из рассмотрения исключены фликкер-шум, рекомбинационный шум и шум в полупроводнике (в анализируемом диапазоне частот эти источники шумов уже не проявляются).

Спектральная плотность мощности амплитудных шумов ПОМ, выделяемых на нагрузке фотодетектора, равна:

$$W_{\text{амп.ш}}(t) = [\varepsilon_{\Phi D} J_{\Phi D}(t)]^2 R_{n,\Phi D} RIN, \quad (20)$$

где RIN – относительный шум интенсивности.

На выходе фотодетектора необходимо учитывать источники со спектральной плотностью мощности дробового шума оптического излучения

$$W_{\text{др.ш}}(t) = 2e_0 [\varepsilon_{\Phi D} J_{\Phi D}(t)] \cdot F_{\text{ш}} R_{n,\Phi D}, \quad (21)$$

шума темнового тока

$$W_{\text{темн.т}} = 2e_0 \overline{i_{\text{темн.т}}} F_{\text{ш}} R_{n,\Phi D} \quad (22)$$

и теплового шума широкополосного усилительного каскада ФПМ

$$W_{\text{тепл.ш.фpm}} = (\text{Ш}_{\text{шу.фpm}} - 1) \cdot k_B T. \quad (23)$$

Здесь $e_0 = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона; $F_{\text{ш}}$ – шум-фактор умножения заряда; $\overline{i_{\text{темн.т}}}$ – среднее значение темного тока фотодетектора; $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура, К; $\text{Ш}_{\text{шу.фpm}}$ – коэффициент шума широкополосного усилителя ФПМ.

Шум-фактор $F_{\text{ш}}$ определяет увеличение среднего дробового шума фотодетектора из-за случайных флуктуаций коэффициента внутреннего умножения заряда. Для $p-n-p$ -фотодиодов $F_{\text{ш}} = 1$, а для лавинных фотодиодов $F_{\text{ш}} > 1$.

Собственные шумы широкополосного выходного усилителя ШУ 13 представляют тепловые шумы, спектральная плотность мощности которых определяется коэффициентом шума $\text{Ш}_{\text{шу.вых}}$:

$$W_{\text{шу.вых}} = (\text{Ш}_{\text{шу.вых}} - 1) \cdot k_B T \quad (24)$$

На входе ДЗУ необходимо учитывать тепловые шумы широкополосного

входного усилителя ШУ 1 со спектральной плотностью мощности

$$W_{шум.вх} = (\Pi_{шум.вх} - 1) \cdot k_B T, \quad (25)$$

где $\Pi_{шум.вх}$ – коэффициент шума входного широкополосного усилителя ШУ 1.

Шумовые свойства волоконно-оптического усилителя ВОУ 5 характеризуются интенсивностью спонтанного излучения на его выходе:

$$J_{спонт} = \frac{1}{2} \Pi_{вых} \cdot \hbar v_{вых} \cdot \Delta v_{вых} \cdot (K_{вых} - 1),$$

где $\Pi_{вых}$ – коэффициент шума волоконно-оптического усилителя;

$\hbar = 1,0546 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка;

$v_{вых}$ и $\Delta v_{вых}$ – частота излучения и полоса пропускания волоконно-оптического усилителя, Гц;

$K_{вых}$ – коэффициент передачи интенсивности оптического излучения волоконно-оптическим усилителем.

Частота излучения волоконно-оптического усилителя $v_{вых}$ связана с длиной волны излучения $\lambda_{вых}$ соотношением:

$$v_{вых} = \frac{c}{N_a \lambda_{вых}},$$

где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с скорость света в вакууме;

N_a – показатель преломления активной среды.

Полоса пропускания волоконно-оптического усилителя $\Delta v_{вых}$ может быть найдена по формуле:

$$\Delta v_{вых} = \frac{c \Delta \lambda_{вых}}{N_a (\lambda_{вых}^2 - 0,25 \cdot \Delta \lambda_{вых}^2)},$$

где $\Delta \lambda_{вых}$ – рабочий диапазон волоконно-оптического усилителя, м.

В выражения для оценки спектральной плотности мощностей амплитудных и дробовых шумов входит интенсивность оптического излучения на фотодетекторе ФПМ $J_{ФД}(t) = J_{ФД,0} + J_{ФД,с}(t)$. Как и в формуле (15) первое слагаемое представляет

постоянную составляющую интенсивности оптического излучения ПОМ в отсутствии радиосигнала. Информация о входном радиосигнале заключена во втором слагаемом и определяется.

Заметим, что согласно выражениям (20) и (21) амплитудные $W_{\text{ампл}}(t)$ и дробовые шумы $W_{\text{др.ш}}(t)$ нестационарны во времени. Поэтому обычно анализируются усредненные за период СВЧ-колебаний спектральные плотности мощности амплитудных и дробовых шумов

$$W_{\text{ампл}} = \epsilon_{\Phi}^2 J_{\Phi,0}^2 R_{\text{в.ФД}} R_{\text{ИН}}; \quad (26)$$

$$W_{\text{др.ш}} = 2\epsilon_0 \epsilon_{\Phi} J_{\Phi,0} F_{\text{ш}} R_{\text{в.ФД}}. \quad (27)$$

Для анализа шумовых параметров ДЗУ удобно привести к входу устройства все слагаемые внутренних флюктуационных шумов. Это позволит предположить, что линейный тракт ДЗУ является нешумящим четырехполюсником и лишь преобразует шумы, поступающие на вход устройства от эквивалентного источника шума со спектральной плотностью мощности

$$W_{\text{доу.и}} = W'_{\text{шум.вх}} + W'_{\text{шум.изл}} + W'_{\text{ампл.ш.и}} + W'_{\text{тепл.т.и}} + W'_{\text{др.ш.и}} + W'_{\text{тепл.ш.ф.ш.и}} + W'_{\text{шум.вых.и}},$$

где W' – спектральная плотность мощности соответствующего источника шума, пересчитанная на вход устройства.

Пусть $K_{\text{вх-ФД.и}}$ – коэффициент передачи мощности i -й копии радиосигнала с входа ДЗУ на выход фотодетектора приёмного модуля. С учётом выражения (7) найдём

$$\begin{aligned} K_{\text{вх-ФД.и}}[\text{дБ}] \approx & K_{\text{р.шум.вх}}[\text{дБ}] + K_{\text{р.дм.и}}[\text{ддБ} + 2K_{\text{вху}}[\text{ддБ} - \\ & - 0,5\alpha_{\text{разъмы}}[\text{дБ}] + \alpha_{\text{согл.вх}}[\text{дБ}] - \alpha_{\text{просб}}[\text{дБ}] - 2\alpha_{\text{вос.и}}[\text{дБ}]] \end{aligned}$$

Аналогично, введём в рассмотрение коэффициент передачи мощности i -й копии радиосигнала с входа ДЗУ на вход выходного широкополосного усилителя ШУ 13

$$\begin{aligned} K_{\text{вх-ш.вых.и}}[\text{дБ}] \approx & K_{\text{р.шум.вх}}[\text{дБ}] + K_{\text{р.дм.и}}[\text{ддБ} + 2K_{\text{вху}}[\text{ддБ} + K_{\text{р.шум.ФШ.и}}[\text{ддБ} - \\ & - \alpha_{\text{pc}}[\text{дБ}] + \alpha_{\text{эк}}[\text{дБ}] - \alpha_{\text{просб}}[\text{дБ}] - 2\alpha_{\text{вос.и}}[\text{дБ}]]] \end{aligned}$$

Ориентируясь на усредненное значение $\overline{J_{\text{фд}}(t)} = J_{\text{фд},0}$ и полагая $J_{\text{фд}}^2(t) = J_{\text{фд},0}^2 + J_{\text{фд},c}^2 \approx J_{\text{фд},0}^2$, найдем спектральные плотности мощности (22)-(27) составляющих внутренних шумов, приведенных к входу ДЗУ,

$$W'_{\text{ампл.и}}[\text{дБм}/\Gamma_{\text{ц}}] = W_{\text{ампл.и}}[\text{дБм}/\Gamma_{\text{ц}}] - K_{\text{вх-фд.и}}[\text{дБ}]; \quad (28)$$

$$W'_{\text{тепл.и}}[\text{дБм}/\Gamma_{\text{ц}}] = W_{\text{тепл.и}}[\text{дБм}/\Gamma_{\text{ц}}] - K_{\text{вх-фд.и}}[\text{дБ}]; \quad (29)$$

$$W'_{\text{др.и}}[\text{дБм}/\Gamma_{\text{ц}}] = W_{\text{др.и}}[\text{дБм}/\Gamma_{\text{ц}}] - K_{\text{вх-фд.и}}[\text{дБ}]; \quad (30)$$

$$W'_{\text{тепл.фот.и}}[\text{дБм}/\Gamma_{\text{ц}}] = W_{\text{тепл.фот.и}}[\text{дБм}/\Gamma_{\text{ц}}] - K_{\text{вх-фд.и}}[\text{дБ}]; \quad (31)$$

$$W'_{\text{шум.и}}[\text{дБм}/\Gamma_{\text{ц}}] = W_{\text{шум.и}}[\text{дБм}/\Gamma_{\text{ц}}] - K_{\text{вх-шум.и}}[\text{дБ}]; \quad (32)$$

$$W'_{\text{шум.вх}}[\text{дБм}/\Gamma_{\text{ц}}] = W_{\text{шум.вх}}[\text{дБм}/\Gamma_{\text{ц}}]. \quad (33)$$

Мощность шумов $P'_{\text{ш.сп.изл}}$, вызванных спонтанным излучением активного вещества волоконно-оптического усилителя ВОУ 5, пересчитанная на вход устройства определяется выражением:

$$P'_{\text{ш.сп.изл}}[\text{дБм}] = 2 \cdot (J_{\text{сп.изл}}[\text{дБм}] - K_{\text{вог}}[\text{дБ}] + \alpha_{\text{конв}}[\text{дБ}] + \alpha_{\text{вход}}[\text{дБ}] - 10 \lg \frac{S_{\text{шум}}^2}{R_{\text{вх.ном}}}) - \\ - K_{\text{р.шум.и}}[\text{дБ}] - K_{\text{р.др.и}}[\text{дБ}] + 0,5 \alpha_{\text{разъём}}[\text{дБ}] + \alpha_{\text{соп.вх}}[\text{дБ}] - 30$$

Для идеализированного линейного тракта с прямоугольной в полосе Π частотной характеристикой мощность шумов $P_{\text{ш}}$ определяется выражением

$$P_{\text{ш}} = W_{\text{ш}} \cdot \Pi,$$

где $W_{\text{ш}}$ – спектральная плотность мощности шума, Вт/Гц.

В этом случае спектральную плотность мощности шума волоконно-оптического усилителя, пересчитанную на вход устройства, можно представить как

$$W'_{\text{ш.сп.изл}} = \frac{P'_{\text{ш.сп.изл}}}{\Pi_{\text{дзу}}},$$

где $\Pi_{\text{дзу}}$ – полюса пропускания ДЗУ, Гц.

Дальнейший анализ шумовых характеристик ДЗУ проводится для последней копии радиосигнала с номером $M = 2^N - 1$. Это объясняется тем, что последняя копия характеризуется максимальным уровнем потерь, а отношение сигнал-шум для неё будет наихудшим. Следовательно, при выполнении некоторых требований к шумовым параметрам для последней копии радиосигнала, для первых копий данные требования будут выполняться автоматически.

Для случая, когда $T=300$ К, $K_{\text{р.шум.вх}}=K_{\text{р.шум.вых}}=30$ дБ, $\bar{W}_{\text{шум.вх}}=\bar{W}_{\text{шум.вых}}=4$ дБ, $K_{\text{р.дм.1}} \approx -3$ дБ, $K_{\text{р.шум.фото}}=10$ дБ, $\bar{W}_{\text{шум.фото}}=6$ дБ, $K_{\text{вог}}=25$ дБ, $\bar{W}_{\text{вог}}=6$ дБ, $\lambda_{\text{вог}}=1550$ нм, $\Delta\lambda_{\text{вог}}=38$ нм, $N_a=3,4$, $S_{\text{нпп}}=75$ мВт/А, $\varepsilon_{\text{фд}}=0,35$ А/Вт, $RIN=-140$ дБ/Гц, $R_{\text{вх.ном}}=R_{\text{в.фд}}=50$ Ом для ДЗУ с четырьмя ВОЛЗ на фиг.8 приведены рассчитанные по формулам (28)-(33) для последней M -й копии радиосигнала зависимости спектральных плотностей мощности источников шумовых составляющих ДЗУ от значения средней интенсивности оптического излучения $J_{\text{нпп},0}$ инжекционного полупроводникового лазера.

На фиг.8 можно выделить три характерных области. Основной вклад в общие шумы ДЗУ при $J_{\text{нпп},0} < -5$ дБм вносят шумы волоконно-оптического усилителя, обусловленные спонтанным излучением его активного вещества. В области $J_{\text{нпп},0} > 2$ дБм главную роль играют амплитудные шумы оптического излучения. Наконец, в области $-5 \text{ дБм} \leq J_{\text{нпп},0} \leq -2$ дБм уровень шумов волоконно-оптического усилителя и амплитудных шумов соизмерим.

Пороговый ток накачки инжекционных полупроводниковых лазеров современных ПОМ лежит в пределах 20...30 мА. Следовательно, ток начального смешения лазера должен быть не менее 30...40 мА, что соответствует интенсивности постоянной составляющей оптического излучения лазера $J_{\text{нпп},0}$, равной 3,5...4,8 дБм (при крутизне преобразования $S_{\text{нпп}} \approx 75$ мВт/А). Из фиг.8 следует, что при таких значениях $J_{\text{нпп},0}$ возможно учитывать только амплитудные шумы оптического излучения.

Из формул (28)-(33) находим коэффициент шума ДЗУ при формировании i -й копии радиосигнала

$$\text{Ш}_{\text{шум},i} = 1 + \frac{W_{\text{шум},i}}{k_B T} = \text{Ш}_{\text{шум},\text{вх}} + \Delta\text{Ш}_i. \quad (34)$$

Величина

$$\Delta\text{Ш}_i = \frac{W'_{\text{шум},\text{вх}} + W'_{\text{амп},i} + W'_{\text{тепл},i} + W'_{\text{др},i} + W'_{\text{тепл,плотн}} + W'_{\text{шум},\text{вых},i} + W'_{\text{шум},\text{вх}} - \text{Ш}_{\text{шум},\text{вх}}}{k_B T}$$

определяет приращение значения коэффициента шума ДЗУ при формировании *i*-й копии радиосигнала за счёт технологического цикла "радиосигнал-оптическое излучение-радиосигнал" а также за счёт накопления тепловых шумов входного широкополосного усилителя, приведённых к входу ДЗУ, и суммирования постоянных составляющих излучений, поступающих в ФПМ по разным траекториям в бинарной ВОС.

Расчеты, проведенные по формуле (34), показывают, что коэффициент шума устройства с четырьмя ВОЛЗ при отсутствии эффектов накопления равен около 24 дБ при установке на входе устройства широкополосного усилителя с коэффициентом усиления мощности радиосигнала 30 дБ. Однако, при увеличении коэффициента усиления входного усилителя до 45 дБ коэффициент шума снижается до 10,2 дБ, а при увеличении до 60 дБ – коэффициент шума снижается до 4,4 дБ и определяется в основном только коэффициентом шума входного усилителя ($\text{Ш}_{\text{шум},\text{вх}} = 4$ дБ). Такое увеличение коэффициента усиления может быть достигнуто путем установки на входе ДЗУ последовательно двух широкополосных усилителей.

Если в блоке управления БУ 7 невозможно определить информацию о моменте прихода радиосигнала и его длительности, то это приведет также к невозможности управления волоконно-оптическим ключом ВОК 6 и электронным ключом ЭК 14. При этом необходимость в делителе мощности ДМ 2, волоконно-оптическом ключе ВОК 6, блоке управления БУ 7 и электронном ключе ЭК 14 отпадает, а функциональная схема динамического запоминающего устройства с бинарной волоконно-оптической структурой приобретет вид, показанный на фиг. 9.

В этом случае согласно соотношениям (3)–(5) для НВО при определении интенсивности $J_{\text{ФД},0}$ необходимо учитывать процесс накопления (суммирования) постоянных составляющих излучений, поступающих в ФПМ по разным траекториям в бинарной ВОС (с временной задержкой).

Действительно, пусть отсчёт интенсивности на ФПМ (в ваттах) производится

в момент времени t . Тогда

$$J_{\Phi D,0}(t) = \sum_{0 \leq i \leq M} K_{BOS,i} J_{POM,0}(t + i\tau_{зад}),$$

где $K_{BOS,i} = K_{BOS,0} 10^{-0,1(\alpha_{BSC,i}[\text{дБ}] + \alpha_{KKT,i}[\text{дБ}])}$, $i = \overline{1, M}$ – коэффициент передачи ВОС при формировании i -й копии радиосигнала,

$K_{BOS,0} = 10^{0,1(K_{BOS}[\text{дБ}] - \alpha_{помод}[\text{дБ}] - \alpha_{пак}[\text{дБ}] - \alpha_{коэф}[\text{дБ}])}$ – коэффициент передачи ВОС при формировании 0-й копии радиосигнала.

Поскольку постоянная составляющая интенсивности оптического излучения ПОМ неизменна, то $J_{POM,0}(t + i\tau_{зад}) = J_{POM,0}$ в любой момент времени $i = \overline{0, M}$. С учётом формул (10) и (13) найдём

$$J_{\Phi D,0} = K_{BOS,0} J_{POM,0} \sum_{0 \leq i \leq M} r^i,$$

где $r = 10^{-0,1(\alpha_{BSC,1}[\text{дБ}] + \alpha_{KKT,1}[\text{дБ}])}$ – уровень потерь оптического излучения за счёт распространения в световоде и кольцевых изгибов катушки при формировании 1-й копии радиосигнала.

Применив правило суммирования членов ряда геометрической прогрессии со знаменателем r , получаем

$$J_{\Phi D,0} = K_{BOS,0} J_{POM,0} \frac{1 - r^{M+1}}{1 - r} = K_{BOS,0} J_{POM,0} K_{нак}$$

или

$$J_{\Phi D,0} [\text{дБм}] = J_{POM,0} [\text{дБм}] + K_{BOS,0} [\text{дБ}] + 10 \cdot \lg K_{нак},$$

где $K_{нак} = (1 - r^{M+1}) / (1 - r)$ – коэффициент накопления, характеризующий увеличение интенсивности постоянной составляющей оптического излучения на входе фотодетектора ФПМ за счёт суммирования в бинарной ВОС.

При четырёх ВОЛЗ (число формируемых копий 15), уровне потерь $r = 0,007$ дБ и периоде повторения $\tau_{зад} = 100$ нс интенсивность постоянной составляющей оптического излучения на входе ФПМ за счёт суммирования в бинарной ВОС возрастает в 15,8 раза или на 12,0 дБ.

Заметим, что если потери оптического излучения на распространение в ВС и

изгибах в катушке ВОЛЗ малы ($r \approx 1$), то $K_{\text{нак}} \approx M + 1$. При этом выражение (44а) может быть преобразовано к виду

$$J_{\text{фд},0} [\text{дБм}] = J_{\text{пом},0} [\text{дБм}] + K_{\text{вов}} [\text{дБ}] - \alpha_{\text{вход}} [\text{дБ}] - \alpha_{\text{нво}} [\text{дБ}] - \alpha_{\text{сод}} [\text{дБ}] + 10 \cdot \lg(M + 1). \quad (35)$$

Из формулы (35) видно, что за счёт суммирования постоянных составляющих излучений интенсивность на входе фотодетектора ФПМ возрастает при $r \rightarrow 1$ практически в $(M+1)$ раз. Хотя это никак не сказывается на интенсивности составляющей полезного излучения, но приводит к резкому увеличению мощности амплитудных и дробовых шумов.

Следует отметить, что в ДЗУ с бинарной ВОС, выполненной схеме, приведенной на фиг.9 наблюдается эффект накопления тепловых шумов входного усилителя и шумов волоконно-оптического усилителя. Суть эффекта накопления заключается в следующем. На входе передающего оптического модуля полезный радиосигнал (2) присутствует в течение сравнительно малого промежутка времени τ_x , в то время как шумы входного усилителя присутствуют в течение всего времени формирования $M\tau_{\text{зад}} + \tau_x$ копий радиосигнала. В результате этого оптическое излучение ПОМ всегда будет промодулировано по интенсивности флуктуациям тепловых шумов входного усилителя. Аналогичные рассуждения справедливы и для шумов спонтанного излучения волоконно-оптического усилителя.

Согласно соотношениям (3)-(5) для НВО требуется просуммировать интенсивности излучений, поступающих в ФПМ по разным тракториям в бинарной ВОС (с временной задержкой). Данный эффект приводит к увеличению спектральной плотности мощности тепловых шумов входного широкополосного усилителя ШУ 1, приведённой к входу ДЗУ,

$$W'_{\text{шум,вх}} = \left(\frac{1 - r^{M+1}}{1 - r} \right)^2 W'_{\text{шум,вх}} = K_{\text{нак}}^2 W'_{\text{шум,вх}}$$

или

$$W'_{\text{шум,вх}} [\text{дБм/Гц}] = W'_{\text{шум,вх}} [\text{дБм/Гц}] + 20 \cdot \lg K_{\text{нак}},$$

а также к увеличению спектральной плотности мощности шумов спонтанного из-

лучения волоконно-оптического усилителя ВОУ 5, приведённой к входу ДЗУ,

$$W'_{\text{ш.сплаз}} = \left(\frac{1 - r^{M+1}}{1 - r} \right) W'_{\text{ш.сплаз}} = K_{\text{нак}} W'_{\text{ш.сплаз}}$$

или

$$W'_{\text{ш.сплаз}} [\text{дБм}/\Gamma_{\text{ц}}] = W'_{\text{ш.сплаз}} [\text{дБм}/\Gamma_{\text{ц}}] + 10 \cdot \lg K_{\text{нак}}.$$

Так, при четырёх ВОЛЗ (число формируемых копий 15), уровне потерь $r=0,07$ дБ и периоде повторения $\tau_{\text{зад}}=100$ нс мощность тепловых шумов входного широкополосного усилителя, приведённой к входу ДЗУ, с учетом эффекта накопления, увеличится в 250 раз или почти на 24 дБ, а мощность шумов волоконно-оптического усилителя возрастет в 15,8 раза или на 12,0 дБ.

Заметим, что при $r \rightarrow 1$ спектральная плотность мощности тепловых шумов входного широкополосного усилителя, приведённая к входу ДЗУ, за счёт накопления возрастает в 256 раз или на 24 дБ.

На фиг.10 приведены зависимости спектральных плотностей мощности источников шумовых составляющих ДЗУ для последней М-й копии радиосигнала от значения средней интенсивности оптического излучения $J_{\text{инж},0}$ инжекционного полупроводникового лазера для устройства, выполненного по схеме, приведенной на фиг.9.

Как видно из фиг.10 амплитудные шумы оптического излучения и тепловые шумы входного широкополосного усилителя увеличились по сравнению с фиг.8 примерно на 24 дБ, дробовые шумы и шумы спонтанного излучения волоконно-оптического усилителя – примерно на 12 дБ. Необходимо отметить, что в области $J_{\text{инж},0} > 5$ дБм главную роль по-прежнему играют амплитудные шумы оптического излучения.

Расчеты показывают, что коэффициент шума устройства с четырьмя ВОЛЗ, выполненного приведенной на фиг.9 схеме, при наличии эффектов накопления равен около 47 дБ при установке на входе устройства широкополосного усилителя с коэффициентом усиления мощности радиосигнала 30 дБ. Однако, при увеличении коэффициента усиления входного усилителя до 45 дБ коэффициент шума снижается всего лишь до 33,3 дБ, а при увеличении до 60 дБ – до 26,4 дБ (для схемы, при-

веденной на фиг. 1 коэффициент шума снижается до 10,2 дБ и 4,4 дБ соответственно). Столь высокое значение коэффициента шума объясняется наличием описанных выше эффектов накопления.

Технический результат при использования динамического запоминающего устройства с бинарной волоконно-оптической структурой заключается в повышении идентичности формируемых копий радиосигнала на выходе динамического запоминающего устройства. Докажем наличие причинно-следственной связи между заявляемой совокупностью признаков и достигаемым техническим результатом.

Неидентичность формируемых копий в устройстве динамической памяти (патент 4557552 США, МКИ³ G 02 B 5/172), содержащем многоотводную волоконно-оптическую линию задержки (ВОЛЗ) в виде намотанного на барабан волоконного световода (ВС) с отводами, определяется уменьшением мощности копий за счет последовательного деления сигнала, потерями в отводах, затуханием оптического сигнала в ВС и конструктивными потерями на изгиб ВС при намотке его на барабан (см. фиг 11).

Интенсивность излучения оптического сигнала J_i , снимаемого с i -го отвода ВОЛЗ, (i -я копия сигнала) определяется выражением

$$J_i[\text{дБм}] = J_0[\text{дБм}] - i \cdot \{-10 \lg(1 - K_{\text{отв}}) + \gamma_{\text{отв}}[\text{дБ}] + \Gamma_{\text{ВС}}[\text{дБ/км}] \cdot L_1[\text{км}] + \alpha_{\text{виток}}[\text{дБ}] \cdot B_1\},$$

где J_0 – интенсивность излучения оптического излучения на входе ВОЛЗ (0-я копия сигнала);

$K_{\text{отв}}$ – коэффициент, показывающий какая часть оптического излучения выводится из ВС в каждом отводе;

$\gamma_{\text{отв}}$ – потери оптического излучения в каждом отводе за счет поглощения;

$\Gamma_{\text{ВС}}$ – погонное затухание сигнала в ВС;

L_1 – длина ВС, обеспечивающего задержку оптического излучения на требуемое время задержки $\tau_{\text{зад}}$ (формирование одной копии сигнала);

$\alpha_{\text{виток}}$ – потери сигнала на один виток ВС при намотки его на барабан;

B_1 – количество витков ВС длиной L_1 , намотанного на барабан.

Типичные значения указанных параметров, на основе которых будут производиться дальнейшие расчеты, следующие: $K_{\text{отв}} = 0,1$, $\gamma_{\text{отв}} = 0,1$ дБ $\Gamma_{\text{ВС}} = 0,2$ дБ/км,

$L_1 \approx 0,02 \text{ км}$, $\alpha_{\text{виток}} = 0,0001 \text{ дБ}$, $B_1 \approx 25$.

Учитывая, что электрическая мощность радиосигнала пропорциональна квадрату интенсивности оптического излучения, неидентичность формируемых копий $\Delta\alpha_M$, определяемая разностью мощностей нулевой и последней M-й копии, будет равна:

$$\Delta\alpha_M[\text{дБ}] = 2 \cdot (J_0[\text{дБм}] - J_M[\text{дБм}]).$$

Для рассматриваемого устройства неидентичность копий составит

$$\begin{aligned}\Delta\alpha_M[\text{дБ}] &= 2M \cdot \{-10 \lg(1 - K_{\text{ст}}) + \gamma_{\text{ст}}[\text{дБ}] + \Gamma_{\text{вс}}[\text{дБ/км}] \cdot L_1[\text{км}] + \alpha_{\text{виток}}[\text{дБ}] \cdot B_1\} \approx \\ &\approx 2M \cdot \{-10 \cdot \lg(1 - 0,1) + 0,1 + 0,2 \cdot 0,02 + 0,0001 \cdot 25\} \approx 1,13 \cdot M \text{ дБ}.\end{aligned}$$

Таким образом, неидентичность формируемых копий для устройства динамической памяти (патент 4557552 США, МКИ³ G 02 B 5/172) при $M = 15$ будет равна $\Delta\alpha_{15} \approx 17 \text{ дБ}$.

Неидентичность формируемых копий в запоминающем устройстве (патент 4479701 США, МКИ³ G 02 B 5/172), содержащим два НВО и ВОЛЗ в виде ВС, проходящего через оба НВО, определяется уменьшением амплитуды копий при рециркуляции сигнала, потерями в НВО, затуханием излучения в ВС и конструктивными потерями на изгиб (см. фиг.12).

Интенсивность излучения оптического сигнала J_i , соответствующего i-й копии, определяется выражением

$$\begin{aligned}J_i[\text{дБм}] &= J_0[\text{дБм}] - i \cdot \{2K_{\text{нво}}[\text{дБ}] + 3\alpha_{\text{сосл}}[\text{дБ}] + 2\gamma_{\text{нво}}[\text{дБ}] + \\ &+ \Gamma_{\text{вс}}[\text{дБ/км}] \cdot L_1[\text{км}] + \alpha_{\text{виток}}[\text{дБ}] \cdot B_1\}.\end{aligned}$$

Неидентичность формируемых копий составит

$$\begin{aligned}\Delta\alpha_M[\text{дБ}] &= 2M \cdot \{2K_{\text{нво}}[\text{дБ}] + 3\alpha_{\text{сосл}}[\text{дБ}] + 2\gamma_{\text{нво}}[\text{дБ}] + \Gamma_{\text{вс}}[\text{дБ/км}] \cdot L_1[\text{км}] + \\ &+ \alpha_{\text{виток}}[\text{дБ}] \cdot B_1\} \approx 2M \cdot \{2 \cdot 3 + 3 \cdot 0,15 + 2 \cdot 0,1 + 0,2 \cdot 0,02 + 0,0001 \cdot 25\} \approx \\ &\approx 13,3 \cdot M \text{ дБ}.\end{aligned}$$

Таким образом, неидентичность формируемых копий в запоминающем устройстве (патент 4479701 США, МКИ³ G 02 B 5/172) при $M = 15$ составит $\Delta\alpha_{15} \approx 200 \text{ дБ}$.

Идентичность копий в динамическом оперативном запоминающем устройстве с радиочастотной обратной связью (патент 2082280 РФ, МКИ⁶ H04B10/00, G02B6/00, заявл. 05.06.95 N 95108961/28, опубл. 20.06.97, БИ 17) определяется коэффициентом передачи мощности радиосигнала по петле обратной связи K_{π} (см. фиг.13).

Мощность i -й копии сигнала P_i на выходе устройства определяется выражением

$$P_i[\text{дБм}] = P_{\text{вх}}[\text{дБм}] + K[\text{дБ}] + i \cdot K_{\pi}[\text{дБ}],$$

где $P_{\text{вх}}$ – мощность радиосигнала на входе устройства;

K – коэффициент прямой передачи мощности радиосигнала с входа устройства на его выход.

Неидентичность формируемых копий при этом составит

$$\Delta\alpha_M[\text{дБ}] = -M \cdot K_{\pi}[\text{дБ}]. \quad (36)$$

При отсутствии априорной информации о моменте прихода и длительности входного радиосигнала максимальное отношение сигнал-шум для M -й копии сигнала достигается при коэффициенте передачи мощности радиосигнала по петле обратной связи K_{π} , равном оптимальному

$$K_{\pi,\text{опт}}[\text{дБ}] = 10 \lg [1 - 1/M]. \quad (37)$$

При $M = 15$ оптимальный коэффициент передачи мощности радиосигнала по петле обратной связи составит $K_{\pi,\text{опт}} \approx -0,3$ дБ, а неидентичность формируемых копий составит

$$\Delta\alpha_{15}[\text{дБ}] \approx -15 \cdot (-0,3) \approx 4,5 \text{ дБ}.$$

При наличии априорной информации о входном радиосигнале максимальное отношение сигнал-шум достигается при $K_{\pi} > 1$. Однако при этом амплитуда копий неограниченно возрастает. Так при рекомендуемом значении $K_{\pi} = 2$ ($K_{\pi}[\text{дБ}] \approx 3$ дБ) неидентичность формируемых копий при $M = 15$ составит $|\Delta\alpha_{15}| \approx 15 \cdot 3 \approx 45$ дБ.

Идентичность копий в динамическом оперативном запоминающем устройстве с оптической обратной связью (патент 2149464 РФ, МКИ7 G11/42, заявл.

19.01.1999 №99101673/09, опубл. 20.05.2000, БИ 14) также определяется коэффициентом передачи мощности радиосигнала по петле обратной связи K_{π} (см. фиг.14)

При отсутствии априорной информации о входном радиосигнале коэффициент передачи мощности радиосигнала по петле обратной связи K_{π} должен быть меньше единицы и можно воспользоваться выражениями (36) и (37) для ДЗУ с радиочастотной обратной связью. При этом $\Delta\alpha_{15} \approx 4,5$ дБ.

При наличии априорной информации о моменте прихода и длительности входного радиосигнала процесс формирования копий разбивается на два этапа:

1) формирование m копий при коэффициенте передачи мощности радиосигнала по петле обратной связи $K_{\pi,1} > 1$ (рекомендуемые значения $10 \geq m \geq 4$ и $K_{\pi} = 2$);

2) формирование требуемого числа копий при $K_{\pi,2} = 1$.

При этом неидентичность формируемых копий определяется увеличением амплитуд копий на первом этапе и составит

$$\Delta\alpha_M[\text{дБ}] = -m \cdot K_{\pi,1}[\text{дБ}]. \quad (38)$$

При $M = 15$, $m = 5$ и $K_{\pi,1} = 2$ ($K_{\pi,1}[\text{дБ}] \approx 3$ дБ) неидентичность копий будет равна $|\Delta\alpha_{15}| \approx 5 \cdot 3 \approx 15$ дБ.

Следует отметить, что с точки зрения идентичности копий наилучшим режимом работы ДЗУ с радиочастотной обратной связью (патент 2082280 РФ, МКИ⁶ Н04В10/00, G02B6/00, заявл. 05.06.95 N 95108961/28, опубл. 20.06.97, БИ 17) и с оптической обратной связью (патент 2149464 РФ, МКИ7 G11 C11/42, заявл. 19.01.1999 №99101673/09, опубл. 20.05.2000, БИ 14) является случай $K_{\pi} \rightarrow 1$. Однако при этом при отсутствии априорной информации о входном радиосигнале (отсутствует возможность исключения накопления шумов при рециркуляции) происходит резкое уменьшение отношения сигнал-шум формируемых копий, а при наличии априорной информации и $K_{\pi} \rightarrow 1$ устройство не будет обеспечивать оптимального режима по отношению сигнал-шум.

Как было показано ранее, для заявляемого технического решения (динамическое запоминающее устройство с бинарной волоконно-оптической структурой) неидентичность формируемых копий определяется только затуханием оптического

сигнала в ВС и конструктивными потерями на изгиб ВС при намотке его на барабан:

$$\Delta\alpha_M[\text{дБ}] = 2M \cdot \{ \Gamma_{\text{вс}}[\text{дБ}/\text{км}] \cdot L_1[\text{км}] + \alpha_{\text{изгиб}}[\text{дБ}] \cdot B_1 \} \approx \\ \approx 2M \cdot \{ 0,2 \cdot 0,02 + 0,0001 \cdot 25 \} \approx 0,0065 \cdot M \text{ дБ.}$$

При $M = 15$ неидентичность копий составит $\Delta\alpha_{15} \approx 0,0065 \cdot 15 \approx 0,2 \text{ дБ.}$

Результаты проведенных расчетов неидентичности по мощности формируемых копий для различных типов устройств динамической памяти показаны на фиг.15.

Из фиг.15 видно, что наилучшую идентичность формируемым копиям обеспечивает заявляемое техническое решение (динамическое запоминающее устройство с бинарной волоконно-оптической структурой). Выигрыш в идентичности формируемым копиями составляет от 22,5 до 1000 раз.

Функциональные элементы динамического запоминающего устройства с бинарной волоконно-оптической структурой и устройство в целом (см.фиг.1) удовлетворяют критерии промышленного применения.

Применительно к элементам схемы ДЗУ 1-6,12,13 (см.фиг.1) можно отметить следующее. Промышленность освоила и серийно выпускает довольно широкий класс полупроводниковых лазерных излучателей и передающих оптических модулей на длину волны (1,3-1,55) мкм, способных работать в одномодовом режиме при комнатной температуре и обладающих приемлемыми потребительскими характеристиками. В частности, передающий оптический модуль ПОМ-13М имеет следующие основные данные (Стручева О.Ф., Безбородова Т.М. Изделия волоконно-оптической техники: Каталог. – М.: Экос, 1993. – 142 с.): длина волны излучения 1,3...1,55 мкм, мощность излучения 1 мВт, ширина огибающей спектра 0,01 нм, скорость передачи информации 5 Гбит/с, одночастотный режим генерации.

Полоса пропускания современных одномодовых волоконных световодов достигает 100 ГГц·км и более при групповой задержке сигнала порядка 5 мкс/км и дисперсия на длине волны 1,3 мкм не более 3,5 пс/(нм·км) (Братчиков А.Н. Волоконно-оптические линии задержки широкополосных радиосигналов// Зарубежная радиоэлектроника. – 1988. – №3. – С. 85-94).

Среди отечественных волоконно-оптических усилителей можно отметить ОА-850 и ОА-1300 с коэффициентами усиления $K_{\text{вых}}$, равными 6 и 10 дБ при уровне входного сигнала 20...100 мкВт (изготовитель НИИ "Волга" НПО "Рефлектор") и одномодовый волоконно-оптический усилитель на длину волны 1,53...1,55 мкм (кооператив "Файбероптик"). Фирма "Пирелли КАВИ СПА" (Италия) предлагает оптический усилитель "AMPLIPHOS" на эрбииевом волокне, работающий в оптическом диапазоне $\lambda = 1530 \dots 1560$ нм и обеспечивающий оптимальное усиление $K_{\text{вых}} = 22 \dots 30$ дБ, а коэффициент шума $Ш_{\text{вых}}$ не превышает 4 дБ.

В настоящее время существуют различные типы волоконно-оптических ключей. Механические ВОК характеризуются низким уровнем оптических потерь (0,5...1 дБ), потребляемой мощностью в несколько милливатт и недостаточно высоким быстродействием (10...50 мс), что и является их основным недостатком. Волоконно-оптические переключатели на жидкких кристаллах не имеют движущихся частей и потенциально более надежны механических. Оптические потери у данного типа ВОК составляют 1...2 дБ, потребляемая мощность 30...50 мкВт и скорость переключения 5...50 мс. Акусто- и магнитооптические ВОК на объемных элементах обеспечивают скорость переключения около 10^{-6} с⁻¹ и имеют уровень оптических потерь 2...3 дБ. Электрооптические переключатели на одномодовых полосковых световодах, имеют оптические потери, включая потери на соединение с волоконными световодами, порядка 2...3 дБ, скорость переключения до 6 ГГц и управляющие напряжения 4...10 В.

Фотоприемные устройства обычно представляют собой сочетание фотодиода и каскада предварительного усиления сигнала фотоответа. Максимальная полоса детектируемых сигналов серийных фотодиодов достигает 5...10 ГГц, при чувствительности по интенсивности оптического излучения порядка -30 дБм, динамическом диапазоне 20...25 дБ и крутизне характеристик детектирования 0,5...0,8 А/Вт по току (Стручева О. Ф., Безбородова Т.М. Изделия волоконно-оптической техники: Каталог. – М.: Экос, 1993. – 142с.)

По данным работы (Микроэлектронные устройства СВЧ / Под ред. Г. И. Веселова. – М.: Высшая школа, 1988. – С.68-75) многоступенчатые делители мощности обеспечивают развязку выходных плеч без применения вентильных устройств до 30 дБ в полосе частот с коэффициентом перекрытия диапазона 1,44. С использова-

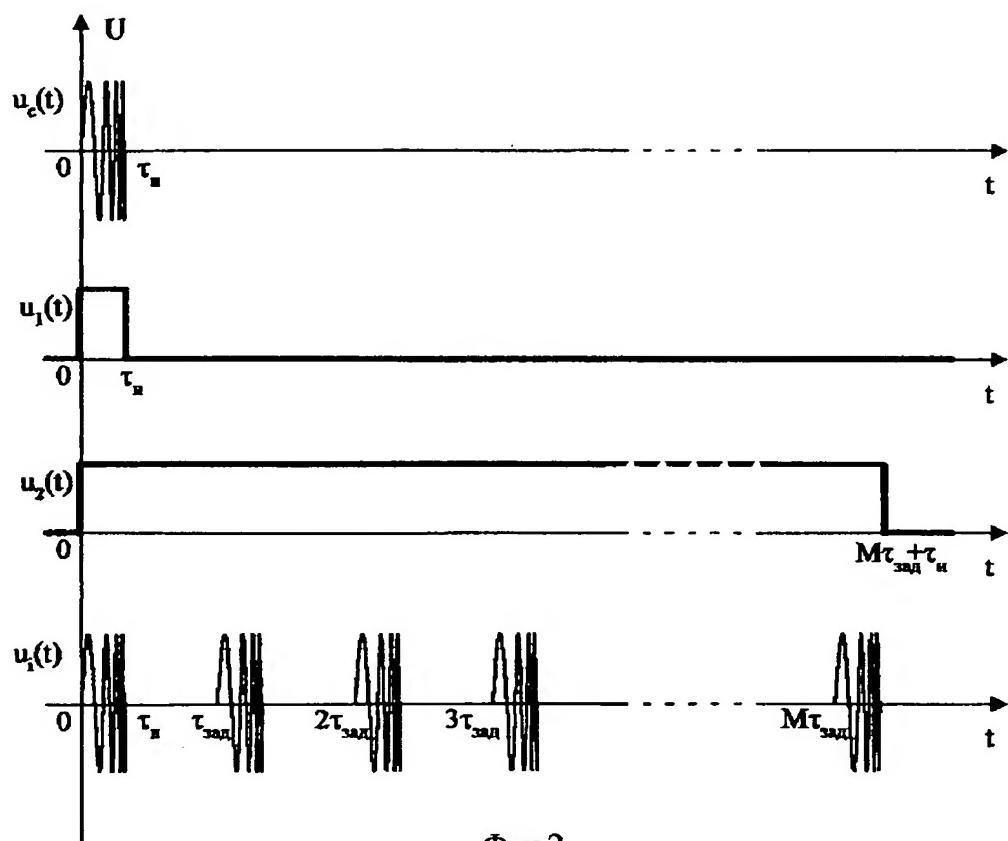
нием современных ферритовых вентиляй (Ферритовые СВЧ приборы // Производственное объединение "Гранит", г. Ростов на Дону, 1992) развязка плеч делителя может быть увеличена не менее чем на 25...30 дБ при прямых потерях порядка 0,5...0,8 дБ.

В качестве широкополосных усилителей в настоящее время наиболее широко используются транзисторные усилители, работающие в диапазоне частот 0,1...25 ГГц и имеющие полосу усиления 4...80%, коэффициент усиления на каскад 5...30) дБ, коэффициент шума 2...6 дБ и динамический диапазон входного сигнала 80...90 дБ (Микроэлектронные устройства СВЧ / Под ред. Г.И. Веселова. – М.: Высшая школа, 1988. – с.78-86, 225).

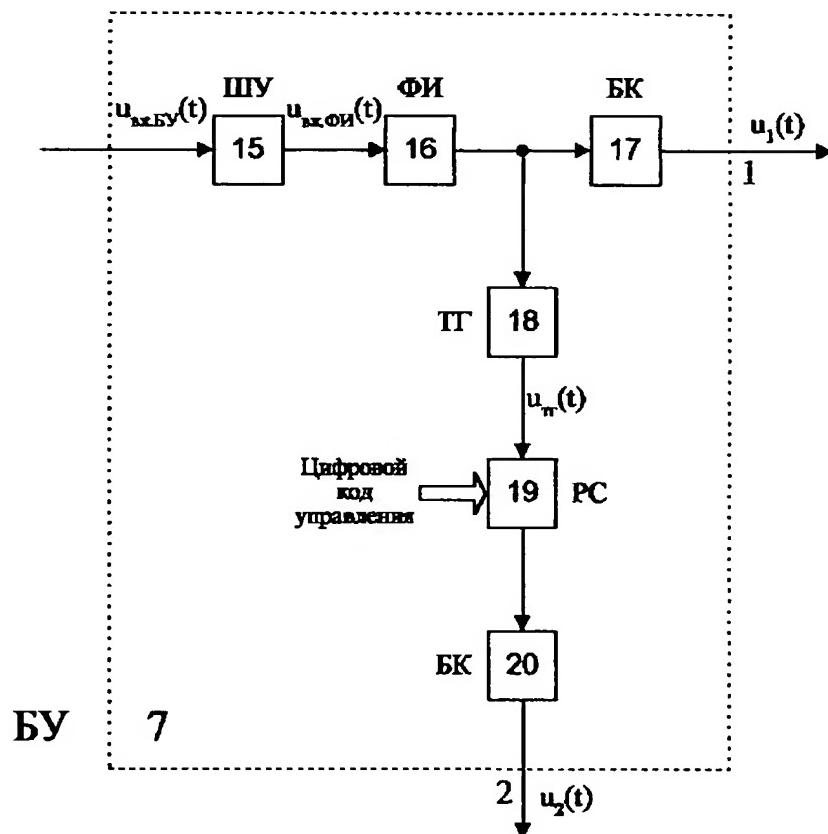
Электронные выключатели (ключи) на современных ріп-диодах широко применяются для управления амплитудой сигнала в трактах СВЧ и обеспечивают в разомкнутом состоянии затухание до 90 дБ, при прямых потерях в замкнутом состоянии не более 1 дБ.

Все элементы БУ 7 также удовлетворяют критерию промышленного применения. Формирователи импульсов легко реализуются на основе, например, последовательного соединения дифференцирующей цепи, усилителя-ограничителя и (при необходимости) инвертора.

RU 2210121 C1



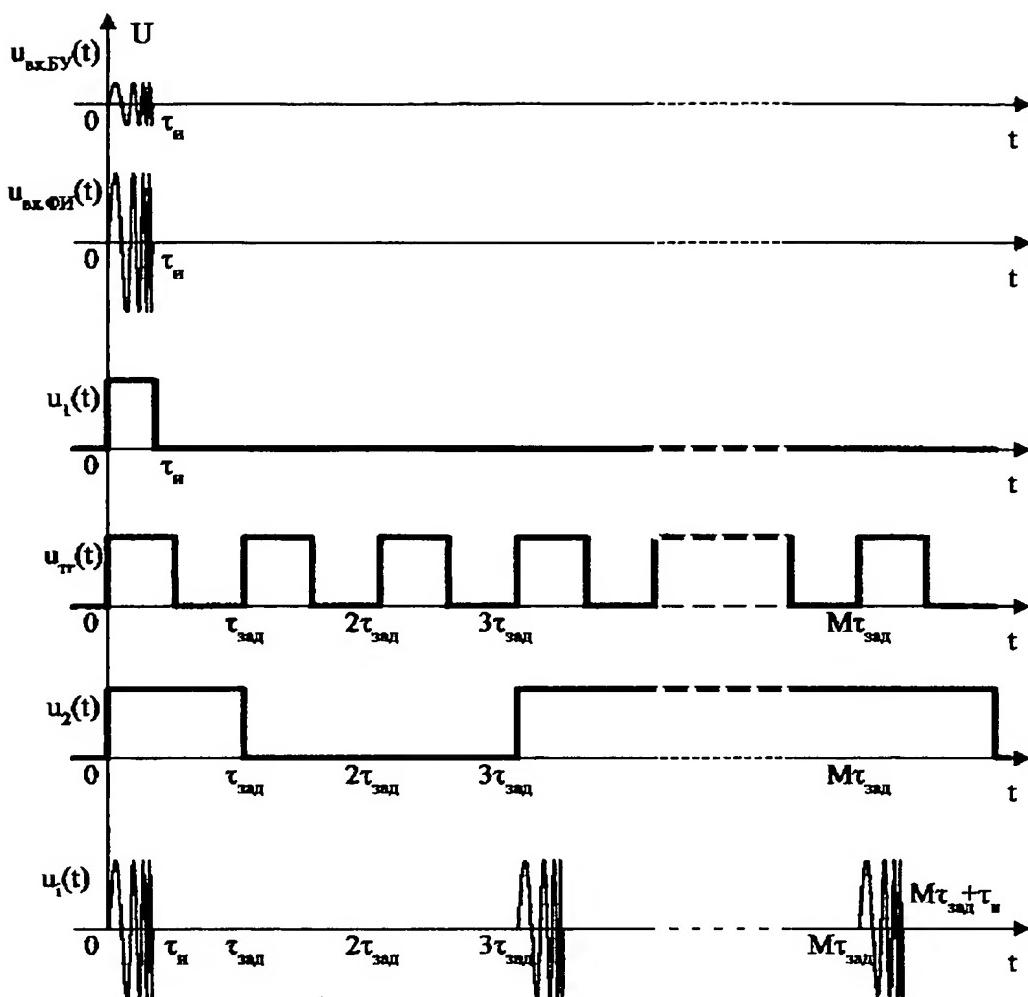
Фиг.2



Фиг.3

RU 2210121 C1

RU 2210121 C1



Фиг.4

RU 2210121 C1

Потери оптического излучения в бинарной волоконно-оптической структуре для последней копии радиосигнала

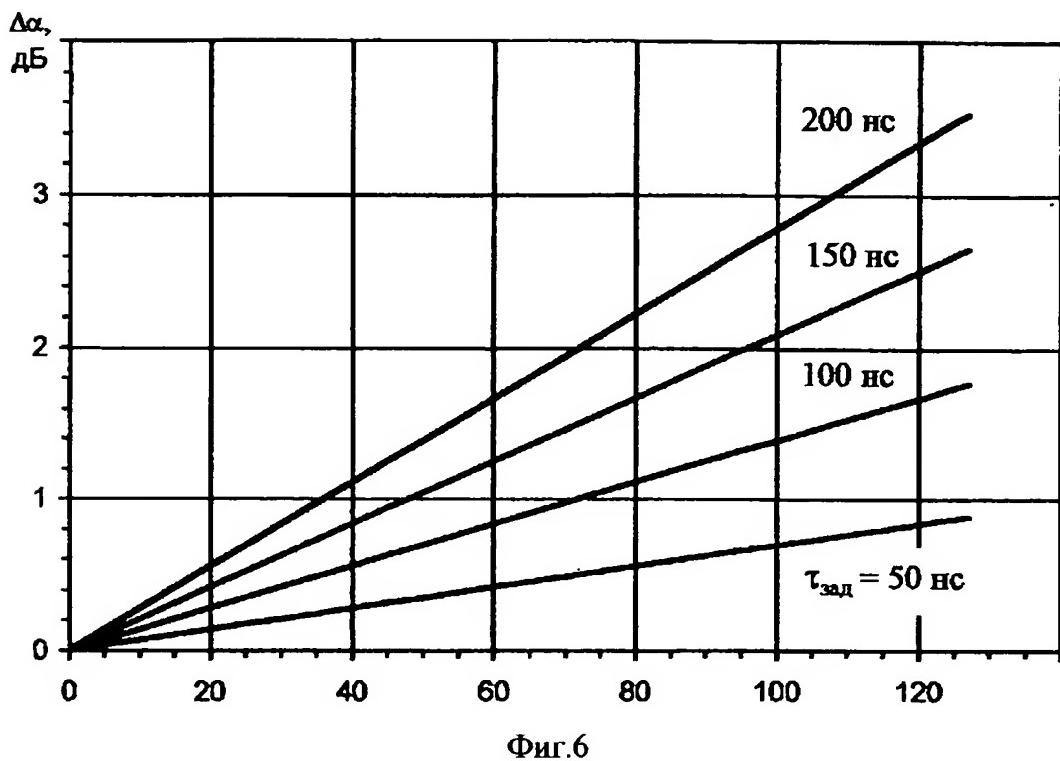
Число ВОЛЗ N	Число копий M+1	Потери в бинарной волоконно-оптической структуре				
		$\alpha_{\text{сод}} \cdot \text{дБ}$	$\alpha_{\text{нво}} \cdot \text{дБ}$	$\alpha_{\text{вс.М}} \cdot \text{дБ}$	$\alpha_{\text{изг.М}} \cdot \text{дБ}$	$\alpha_{\text{вос.М}} \cdot \text{дБ}$
1	2	1,4	3,21	0,0044	0,0026	10,71
2	4	1,7	6,32	0,0132	0,0076	14,13
3	8	2,0	9,43	0,031	0,0178	17,57
4	16	2,2	12,54	0,066	0,038	21,04
5	32	2,5	15,65	0,136	0,079	24,56
6	64	2,8	18,76	0,28	0,16	28,19
7	128	3,1	21,87	0,59	0,32	32,05
8	256	3,4	24,98	1,12	0,65	36,35
9	512	3,7	28,09	2,25	1,30	41,53
10	1024	4,0	31,10	4,50	2,61	48,50
11	2048	4,3	34,21	9,00	5,21	59,02
12	4096	4,6	37,32	18,02	10,43	76,66
13	8192	4,9	40,43	36,04	20,86	108,5
14	16384	5,2	43,54	72,09	41,72	168,9

Фиг.5

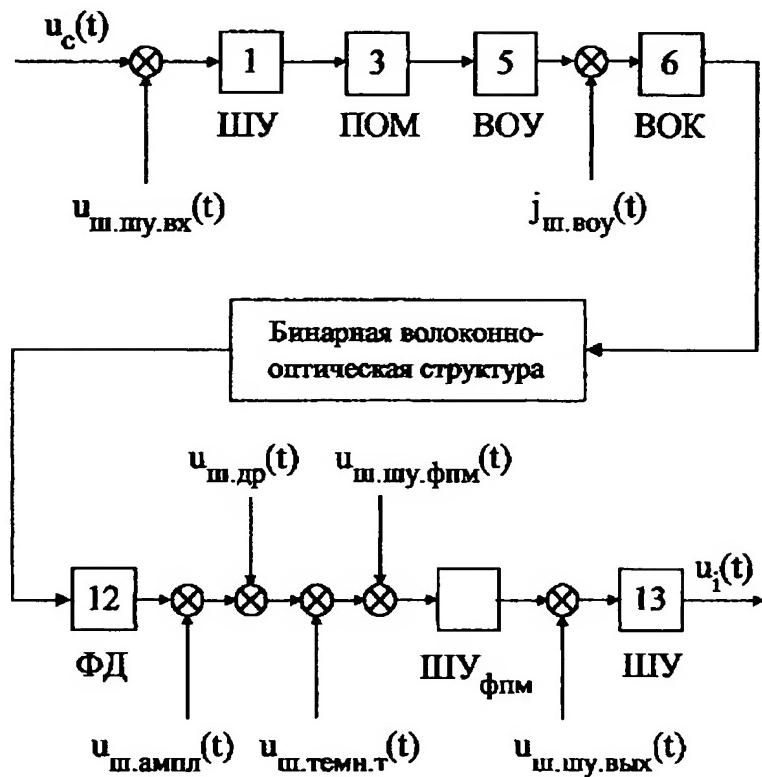
RU 2 2 1 0 1 2 1 C1

RU 2 2 1 0 1 2 1 C1

R U ? 2 1 0 1 2 1 C 1



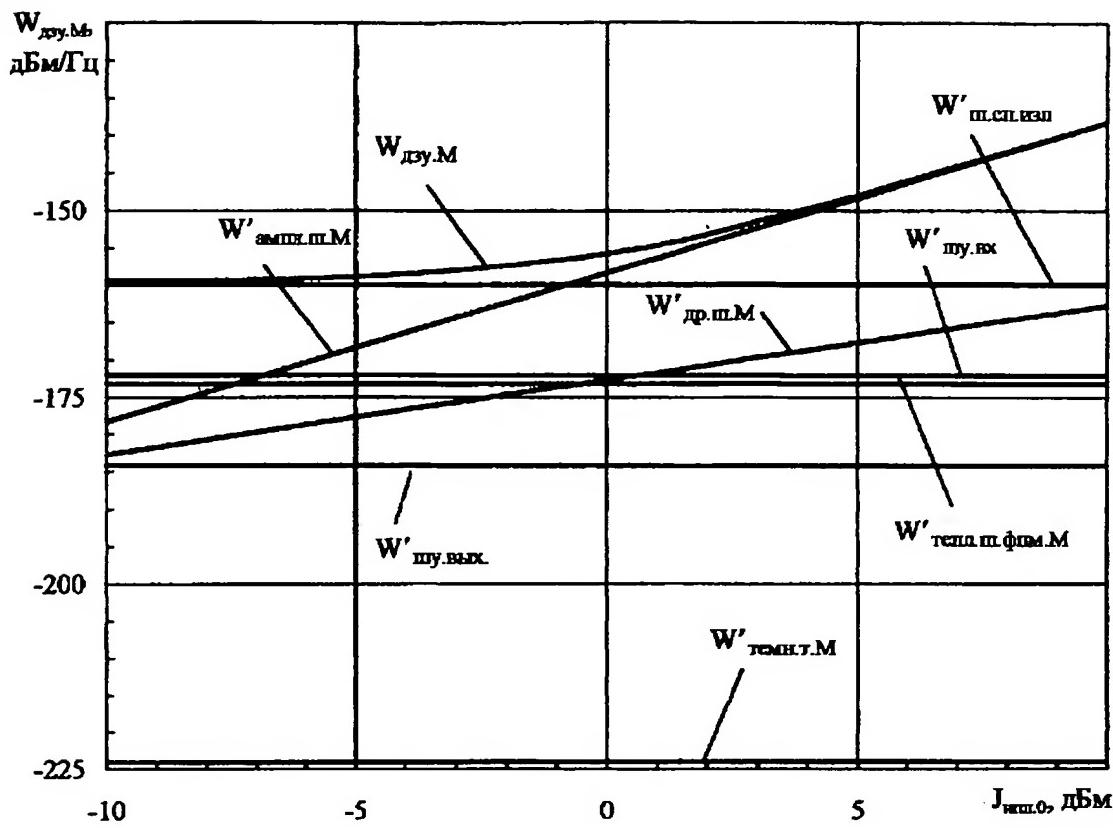
Фиг.6



Фиг.7

R U 2 2 1 0 1 2 1 C 1

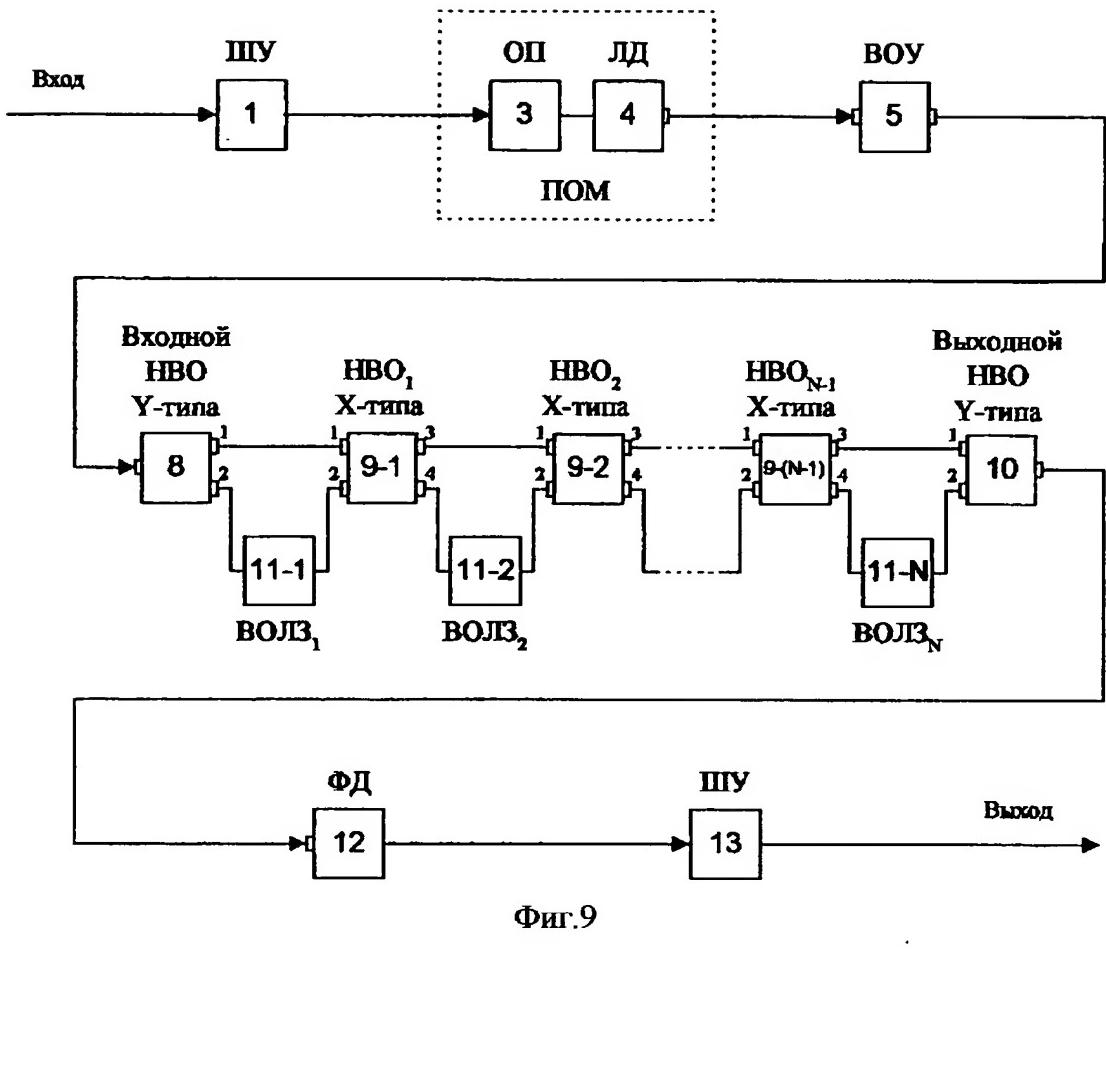
RU 2210121 C1



Фиг.8

RU 2210121 C1

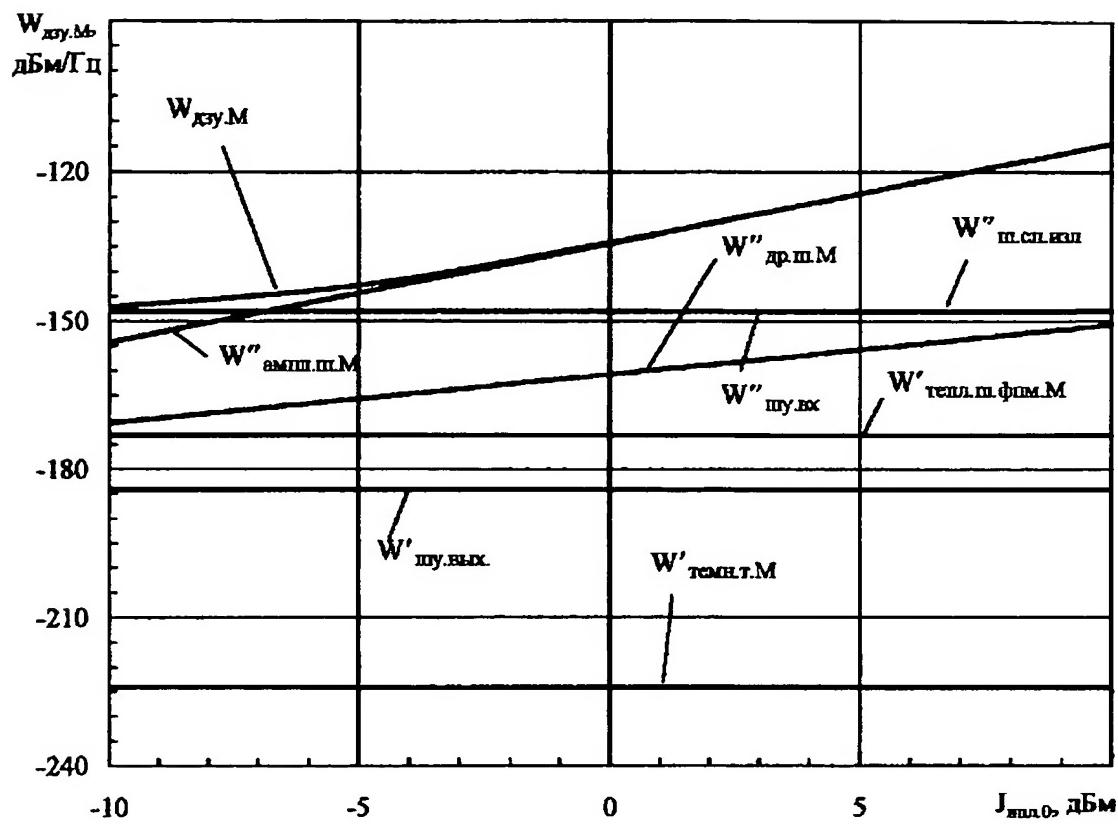
RU 2210121 C1



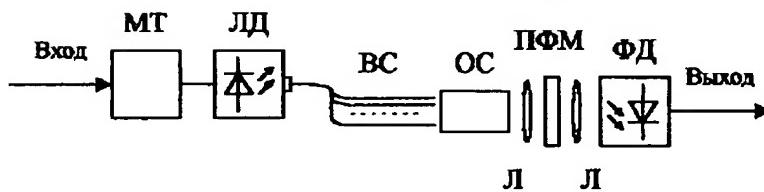
Фиг.9

RU 2210121 C1

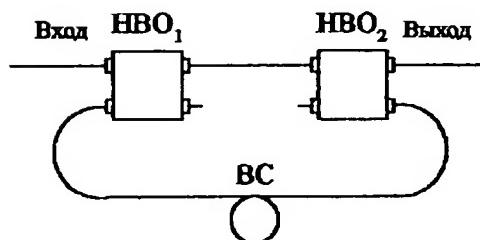
RU 2210121 C1



Фиг.10



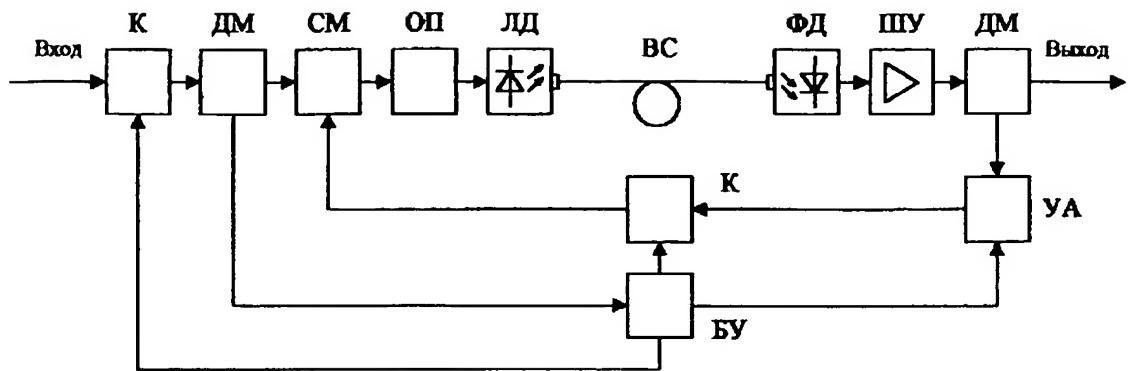
Фиг.11



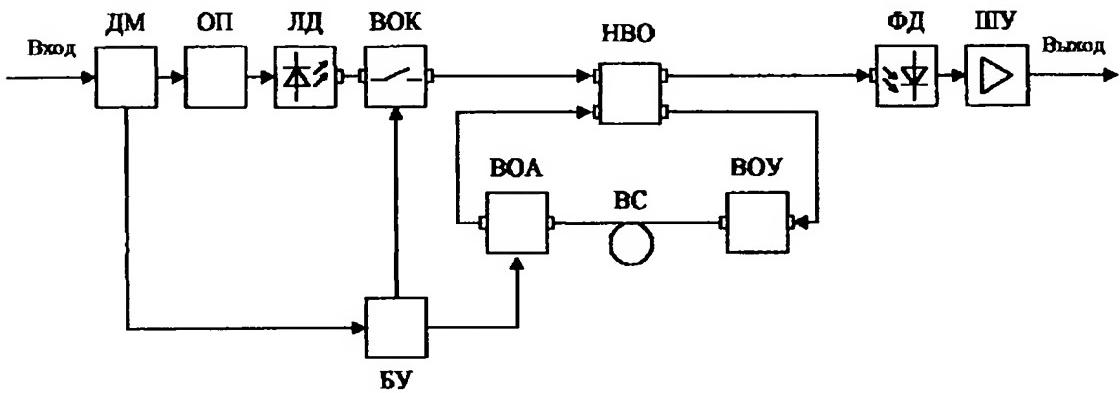
Фиг.12

RU 2210121 C1

RU 2210121 C1



Фиг.13



Фиг.14

RU 2210121 C1

Тип устройства	Неидентичность формируемых копий при $M = 15$	
	при отсутствии априорной информации о входном радиосигнале	при наличии априорной информации о входном радиосигнале
1. Устройство динамической памяти (патент 4557552 США, МКИ ³ G 02 B 5/172)		17 дБ
2. Запоминающее устройство (патент 4479701 США, МКИ ³ G 02 B 5/172)		200 дБ
3. Динамическое оперативное запоминающее устройство с радиочастотной обратной связью (патент 2082280 РФ, МКИ ⁶ H04B10/00, G02B6/00)	4,5 дБ	45 дБ
4. Динамическое запоминающее устройство с оптической обратной связью (патент 2149464 РФ, МКИ ⁷ G11 C11/42)	4,5 дБ	15 дБ
5. Заявляемое техническое решение (динамическое запоминающее устройство с бинарной волоконно-оптической структурой)		0,2 дБ

Фиг.15